



**INSTITUTO DE
TECNOLOGIA**

PROF. JORGE A. SABATO

**UNIVERSIDAD NACIONAL
DE GENERAL SAN MARTIN
COMISION NACIONAL
DE ENERGIA ATOMICA**

**MAESTRIA EN
CIENCIA Y
TECNOLOGIA
DE MATERIALES**

ANALISIS Y EVALUACION DE PARÁMETROS QUE AFECTAN LA DETECTIBILIDAD DE DEFECTOS POR ULTRASONIDO

Edmundo Tolabin

UNIVERSIDAD NACIONAL DE GENERAL SAN MARTIN

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA

INSTITUTO DE TECNOLOGIA

"Prof. Jorge A. Sabato"

**Análisis y evaluación de los parámetros que afectan la
detectabilidad de defectos por ultrasonido (*)**

por Ing. Edmundo Tolabín

Director

Ing. Carlos A. Desimone

Ing. Pablo Katchadjian

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA CENTRO DE INFORMACION C A C

(*) Tesis para optar al título de *Magister en Ciencia y Tecnología de Materiales*

República Argentina

1998

A mis padres Paulino y Herminia

A mi hermana Nélida

A mi hermano Juan

A mis hijos David, Raúl, Irina y RoslÍ

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Cesar G. Belinco, Jefe de la Unidad de Actividad Ensayos No Destructivos y Estructurales del C.A.C., de la Comisión Nacional de Energía Atómica, por su apoyo incondicional para el desarrollo del presente trabajo.

A los Ings. Carlos A. Desimone y Pablo Katchadjian por aceptar la dirección de la tesis y brindar conocimiento de excelente nivel, lo que permitió integrar los diferentes aspectos de la física y la tecnología abordados durante el transcurso del trabajo.

Al Sr. Andrés Acosta por su criteriosa colaboración en las tareas de taller de mecanizado y soldadura.

Al Sr. Roberto Giacchetta, estudiante avanzado de Ingeniería Electrónica, por su colaboración en la comprensión de temas complejos relacionados con el procesamiento de señales y desarrollo de inteligencia artificial.

A los Sres. Oscar Carpinetta, Ramón Castillo Guerra y Ricardo Montero de la Unidad de Actividad Materiales, por su invaluable ayuda en tareas de laboratorio.

Al personal de SIDERCA y del CINI, por su apoyatura en la provisión y caracterización de material para ensayos.

A todos los integrantes del INEND, dependiente del ENDyE del CAC de la CNEA, sin cuyo apoyo no hubiese sido posible el desarrollo del presente trabajo.

RESUMEN



RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo la construcción de probetas de acero por soldadura, para el estudio de la detectabilidad de la defectología característica interna por ultrasonido, dado que a escala industrial y en general en el campo de la ciencia y la tecnología los problemas de mayor gravedad están relacionados con la presencia de este tipo de discontinuidades.

El importante avance logrado en el desarrollo de instrumental y de sistemas de procesamiento de datos, hace que la formación de personal calificado para el control de los componentes por ensayos no destructivos se torne crítica. La efectividad de la aplicación de estas técnicas y en particular del ultrasonido depende en gran parte de la aptitud del personal de operación (aproximadamente en un 80 %), por lo que resulta relevante el entrenamiento de operadores de todos los niveles. Ante esta situación y la alta competitividad existente en el espectro productivo, hay una tendencia a buscar soluciones a través de la automatización, mediante el desarrollo de sistemas de inteligencia artificial para lograr un mayor volumen y calidad de piezas controladas en línea de producción.

La construcción de las probetas, el estudio de las variables de proceso y operativas de la soldadura; la evaluación de la defectología característica y el procesamiento de la información con un sistema de adquisición de datos GAGESCOP y software basado en la aplicación de MATLAB 4.2 y Toolbox, se ha realizado aplicando el método científico-tecnológico, de manera de posibilitar la interacción con otros centros de investigación.

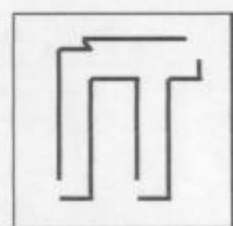
Los aspectos precedentemente descriptos se han tenido en cuenta en el estudio, de manera que las probetas obtenidas pueden ser utilizadas para entrenamiento y certificación de operadores de END, verificación de instrumental e implementación de algoritmos basados en la técnica de IA (inteligencia artificial), destinada a automatización industrial. Para este último caso, se ha conformado una base de datos con el propósito de posibilitar el desarrollo de un sistema de redes neuronales según el Modelo de Aprendizaje Supervisado.

INDICE

TITULO	PAGINA
RESUMEN	i
INTRODUCCION	1
1.- PROCESOS DE SOLDADURA PARA INDUCCION DE DEFECTOLOGIA CARACTERISTICA	7
1.1.- ASPECTOS GENERALES	8
1.2.- CARACTERISTICAS PRINCIPALES DE LOS PROCESOS DE SOLDADURA	8
1.3.- PROCESOS DE SOLDADURA DE ARCO ELECTRICO SMAW Y GMAW	12
1.4.- LA SOLDADURA, MICROESTRUCTURA Y PROPIEDADES DEL ACERO	18
1.5.- DEFECTOLOGIA CARACTERISTICA DE LOS PROCESOS DE SOLDADURA DE ARCO ELECTRICO	23
1.5.1.- ASPECTOS GENERALES	23
1.5.2.- CLASIFICACION DE LAS DISCONTINUIDADES DE LA SOLDADURA	23
1.5.3.- GRADO DE SEVERIDAD DE LAS DISCONTINUIDADES	25
1.5.4.- FORMACION DE DISCONTINUIDADES EN UNIONES SOLDADAS	25
1.5.5.- CONDICIONES PARA LA INDUCCION DE DISCONTINUIDADES POR PROCESOS DE SOLDADURA DE ARCO ELECTRICO	26
2.- ENSAYO DE ULTRASONIDO PARA DETECCION DE DISCONTINUIDADES EN SOLDADURA	30
2.1.- GENERALIDADES	31
2.2.- PROPAGACION DE LAS ONDAS ULTRASONICAS	33
2.2.1.- ASPECTOS GENERALES	33
2.2.2.- VIBRACIONES LIBRES, VIBRACIONES FORZADAS Y RESONANCIA	35
2.2.3.- MOVIMIENTO DE ONDAS PLANAS	38
2.2.4.- IMPEDANCIA ACUSTICA	40
2.2.5.- INTENSIDAD ACUSTICA	40
2.2.6.- ESCALA DE DECIBELES	41
2.2.7.- PRESION DE LA RADIACION	41
2.3.- TRANSDUCTORES	41
2.4.- INTERACCION DEL HAZ ULTRASONICO CON EL ACERO	45
2.4.1.- FORMA DE PROPAGACION DEL HAZ ULTRASONICO	45
2.4.2.- ATENUACION DE ONDAS ACUSTICAS	46
2.4.3.- REFLEXION Y TRANSMISION DE ONDAS ACUSTICAS	47
2.5.- TECNICA E INSTRUMENTOS PARA ENSAYO DE ULTRASONIDO	51
2.5.1.- SELECCION DE LA TECNICA	51
2.5.2.- TECNICA DE PULSO-ECO	51
2.5.3.- CIRCUITO GENERADOR DE BARRIDO Y DE PULSOS	54
2.5.4.- EQUIPOS DE ULTRASONIDO	56
2.5.5.- CARACTERISTICAS DE LOS TRANSDUCTORES UTILIZADOS	58

3.- DESARROLLO EXPERIMENTAL	59
3.1.- CONSTRUCCION DE PROBETAS CON DEFECTOLOGIA INDUCIDA POR SOLDADURA	60
3.1.1.- PROCEDIMIENTO PARA LA CONSTRUCCION DE LAS PROBETAS	60
3.1.2.- SELECCION DEL MATERIAL	60
3.1.3.- DISEÑO DE LAS JUNTAS	61
3.1.4.- CARACTERIZACION DEL MATERIAL	63
3.1.5.- CONTROL DE CALIDAD SUPERFICIAL	66
3.1.6.- CALIDAD DE LOS ELECTRODOS UTILIZADOS	66
3.1.7.- DETERMINACION DEL GRADO DE ATENUACION	67
3.1.8.- TRATAMIENTO TERMICO DE MATERIAL CON ALTO GRADO DE ATENUACION	71
3.1.9.- SOLDADURA DE PROBETAS	73
3.1.10.- DETALLE DE REFLECTORES	83
3.2.- DETECCION DE REFLECTORES POR ULTRASONIDO	84
3.2.1.- PROCEDIMIENTO PARA DETECCION Y CARACTERIZACION DE REFLECTORES	84
3.2.2.- CALIBRACION DEL SISTEMA PARA ENSAYO DE ULTRASONIDO	85
3.2.3.- METODO DE EXPLORACION	85
3.2.4.- METODO DAC PARA DETECCION DE REFLECTORES	87
3.3.- PROCESAMIENTO DE LA SEÑAL ULTRASONICA	95
4.- RESULTADOS EXPERIMENTALES	99
4.1.- PROBETAS CONSTRUIDAS	100
4.2.- DETALLE DE REFLECTORES	102
4.3.- REGISTRO DE LA INFORMACION	106
4.4.- PROCESAMIENTO DE LA SEÑAL ULTRASONICA DE REFLECTORES	110
5.- ANALISIS DE RESULTADOS	113
5.1.- ASPECTOS GENERALES	114
5.2.- MATERIALES Y CARACTERISTICAS DE DISEÑO	116
5.3.- PROCESOS DE SOLDADURA Y REFLECTORES	117
5.4.- TECNICA Y OPERADORES DE ULTRASONIDO	119
5.5.- EQUIPOS Y TRANSDUCTORES PARA ULTRASONIDO	129
5.6.- SISTEMAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL	120
6.- CONCLUSIONES	122
7.- REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	125
ANEXOS	129
ANEXO I - ECUACIONES Y CONSTANTES DE LA FISICA Y LA METALURGIA DE LA SOLDADURA	130
ANEXO II – ANALISIS QUIMICO DE LOS ACEROS EMPLEADOS	131
ANEXO III - PROGRAMA DE MATLAB PARA PROCESAMIENTO DE ARCHIVOS *.SIG DE SEÑALES ULTRASONICAS DIGITALIZADAS	132
ANEXO IV – RADIGRAFIAS DE DEFECTOLOGIA CARACTERISTICA	134

INTRODUCCION



INTRODUCCION

En la actualidad, para el diseño de componentes de acero, destinados a servicios industriales en condiciones críticas (presión, temperatura, corrosión, etc.), se debe tener en cuenta los siguientes factores fundamentales:

- Integridad. El aseguramiento de la integridad se basa en aspectos tales como la innovación tecnológica (relacionada con la construcción de modernos reactores para procesos complejos de alta temperatura y transformaciones termomecánicas), la implementación de sistemas de calidad que incluyen la calificación del personal de las diferentes áreas vinculadas a la línea productiva, la investigación dirigida a la mejora del producto (tanto para competir como para afrontar las crecientes exigencias tecnológicas), la seguridad y la preservación del medio ambiente.

- Durabilidad. Es importante la determinación del tiempo de vida útil de un componente. En la mayoría de los casos esta cuestión se transforma en una exigencia, dado que afecta significativamente a las inversiones.

Las etapas mas importantes que se cubren en la construcción y montaje de componentes industriales de características similares a las descritas precedentemente, son las siguientes:

- Elaboración de la aleación: Se emplean procesos de reducción directa o de fusión de minerales de hierro; procesos de aceración primaria con convertidores que utilizan hasta 100 % de carga sólida u hornos eléctricos de alta potencia; procesos de aceración secundaria con metalurgia en vacío y barrido con gases inertes para lograr alta homogeneidad química, el menor contenido posible de oxígeno, hidrógeno, nitrógeno y un nivel controlado de impurezas; procesos de aceración terciaria tales como VAR (refusión por arco en vacío) o ESR (refusión bajo escoria electroconductora), con los que se logra una estructura de solidificación primaria fina y un estado de segregación que mejora las propiedades mecánicas transversales (Fig. 1). Para algunos componentes destinados a la industria aeroespacial se emplea un proceso de refinación de elementos químicos, eliminación de impurezas y control de segregación, denominado VADER (refusión bajo vacío de doble electrodo). En este caso los electrodos están constituidos por la aleación previamente tratada por procesos VAR o ESR.

- Tratamiento termomecánico: Forja de grandes componentes donde se utilizan lingotes de hasta 150 tn (partes de recipientes para alta presión y alta temperatura, rotores de turbinas, hélices, tubos de pared gruesa, etc.); laminación controlada; tratamientos térmicos (la difusión de hidrógeno para secciones superiores a 100 mm suele durar mas de 800 horas, en condiciones de enfriamiento controlado).

- Mecanizado y soldadura: Los componentes destinados a equipos de alta productividad continua no pueden ser fabricados como una sola pieza. Si bien la forma geométrica prevista en diseño se puede lograr por moldeado directo, la estructura de solidificación primaria, el rechupe, la porosidad interna, la macrosegregación y una elevada heterogeneidad química constituyen una limitación determinante, de forma tal que no es posible lograr las propiedades físicas que se requieren para las exigencias previstas.

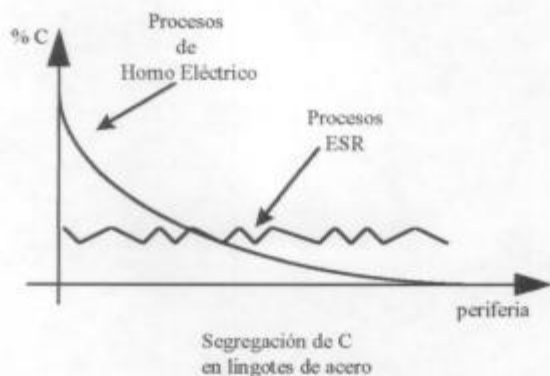


Fig. 1 - Segregación de C para diferentes procesos de fusión

Sobre la base de lo planteado, para lograr la unión metalúrgica en la fabricación y montaje de los componentes, es necesario recurrir a la aplicación de diversos procesos de soldadura, entre los que se destacan los de arco eléctrico como el de GMAW (soldadura con protección gaseosa, automática y semiautomática), SMAW (soldadura manual con electrodo revestido), GTAW (soldadura con electrodo de tungsteno y protección gaseosa) y SAW (soldadura por arco sumergido). La característica principal de estos procesos industriales es la alta energía utilizada para lograr la unión metalúrgica de los componentes. El arco eléctrico alcanza en el núcleo alrededor de 1.8×10^4 °K, con lo cual casi instantáneamente se logra la fusión localizada de los componentes a unir. De esta manera, el material de partida, con un estado casi ideal en su microestructura y en consecuencia con propiedades altamente homogéneas, es sometido a nuevas transformaciones físicas y químicas que derivan inevitablemente en la aparición de diversos tipos de heterogeneidades y estructura martensítica, crecimiento de grano, formación de compuestos químicos no-metálicos e intermetálicos, presencia de gases que inducen porosidad, fisuras, etc. El estado de tensiones residuales y la variación dimensional que presenta el componente luego de la soldadura es de tal magnitud que su estudio es abordado por especialistas a través de grupos de investigación (Fig. 2). En la construcción de este tipo de equipos y su instalación, con la aplicación de procesos de soldadura, los aceros son sometidos a una fase crítica que afectan a su integridad y durabilidad. Por esta causa se han desarrollado diversas técnicas y métodos de control de las soldaduras, entre los que se destacan los ensayos no destructivos que se utilizan para la detección y dimensionamiento de discontinuidades, internas y superficiales. La metalografía no destructiva por medio de técnicas de replicación puede indicar el estado de la microestructura, con lo que se puede predecir la durabilidad.

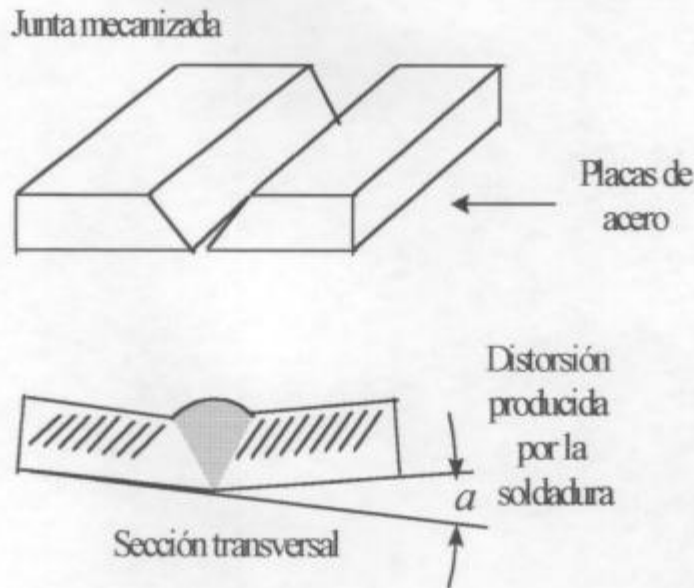


Fig. 2 - Distorsión geométrica producida por la soldadura de arco eléctrico

En el campo de la ciencia y la tecnología existe un permanente interés en el desarrollo e investigación de técnicas de evaluación de la integridad de un componente industrial (unión soldada, pieza reparada, etc.). La tendencia está dirigida hacia la automatización e implementación de inteligencia artificial, teniendo en cuenta los importantes avances logrados en la electrónica y en sistemas de procesamiento de datos. De esta manera, la eficacia para la detección de discontinuidades y su medición depende en gran parte de la aptitud del personal de operación.

A fin de atenuar los efectos de los procesos de soldadura por arco eléctrico y para resolver otros problemas en los cuales resulta muy difícil su aplicación, se han desarrollado otras técnicas de unión metalúrgica en estado sólido tales como soldadura por difusión, soldadura por fricción, soldadura por impacto, etc. En la tabla 1, se observa la defectología detectada en uniones logradas por estos procesos de soldadura (1).

En los casos de grandes secciones y alta productividad, estos procesos no puede competir con los de soldadura por arco eléctrico. Por esta razón, el presente trabajo está dirigido al estudio de la detectabilidad de la defectología característica de uniones soldadas por procesos de soldadura automática por arco eléctrico con protección gaseosa y soldadura manual por arco eléctrico con electrodo revestido.

La construcción de la probetas se ha realizado poniendo a punto la técnica de inducción de defectos característicos por soldadura y recurriendo a comprobaciones metalográficas. Se han analizado los parámetros fundamentales del proceso de soldadura aplicado y del material, de manera de operar en condiciones controladas.

Defecto	Método de soldadura				
	Resistencia eléctrica	Impacto	Flash	Fricción	Difusión
Fisuras en caliente	-	-	-	-	-
Salpicaduras	*	-	*	-	-
Decarburación	*		*	*	-
Soldadura en frío	-	*	-	*	*
Unión parcial	*	*	*	*	*
Inclusiones	*	*	*	*	*
Porosidad	*	*	*	*	*
Hidrógeno atrapado	*	*	*	*	*

Tabla 1: Defectos detectados en soldadura en estado sólido

Para el estudio de la defectología de las probetas soldadas, se han empleado equipos de ultrasonido de última generación, incluyendo los de tipo digital. En estas condiciones, el tratamiento de la información se ha llevado a cabo a través de una computadora especialmente preparada con un sistema de adquisición de datos, digitalización de las señales electrónicas y procesamiento matemático, acorde a la metodología empleada en los principales laboratorios e institutos de ensayos no destructivos y soldadura.

El trabajo desarrollado y los resultados obtenidos, constituyen una base importante para el estudio de sistemas de inteligencia artificial por métodos heurísticos. El conjunto de probetas logrado, sirve también para la calificación y entrenamiento de personal en las diferentes técnicas de ensayos no destructivos (ultrasonido, radiografía industrial, partículas magnéticas, inspección visual y tintas penetrantes).

Se han citado los inconvenientes surgidos en el desarrollo del trabajo. Acorde con la postura de Thomas Kuhn relativa al conocimiento científico (2), no se ha buscado la perfección sino que se ha tratado de resolver los problemas planteados en consonancia con los avances y exigencias de la ciencia y la tecnología.

En el capítulo 1 se describen los estudios realizados de los procesos de soldadura empleados para la construcción del banco de probetas de acero con defectología característica. El capítulo 2 trata acerca de los principios físicos del ultrasonido aplicado a la detección de discontinuidades. En el capítulo 3 se describe la parte experimental relativa a la construcción de las probetas y la evaluación de la defectología por la técnica de pulso-eco. En los capítulos 4 y 5 se analizan los resultados obtenidos y se formulan las conclusiones.

El desarrollo del trabajo se basó en una extensa tarea experimental y en el uso de equipamiento e instrumental de alta tecnología. La bibliografía necesaria para el estudio de las técnicas de ultrasonido y el procesamiento de datos, en gran parte se logró a través de Internet y en publicaciones recientes.

1

PROCESOS DE SOLDADURA
PARA INDUCCION
DE DEFECTOLOGIA
CARACTERISTICA



1 - PROCESOS DE SOLDADURA PARA INDUCCION DE DEFECTOLOGIA CARACTERISTICA EN UNIONES SOLDADAS

1.1 Aspectos Generales

La fabricación de componentes de acero para industrias de alta producción con exigencias de presión, temperatura y corrosión, en su etapa final incluye la aplicación de procesos de soldadura. Una de las consecuencias de la aplicación de dichos procesos es la generación diferentes tipos de discontinuidades.

Los procesos de soldadura mas utilizados en la fabricación de estos componentes son los siguientes:

1 - Soldadura manual de arco eléctrico con electrodo revestido, identificado con las siglas SMAW (Shielded Metal Arc Welding)

2 - Soldadura por arco eléctrico, con protección gaseosa. Se identifica con las siglas GMAW (Gas Metal Arc Welding). Si la torcha, a través de la cual se alimenta el alambre, es guiada por el operario se denomina semiautomática. Si el desplazamiento del cabezal se realiza por medio de un motor eléctrico, el proceso es automático

3 - Soldadura con electrodo de tungsteno y protección con gas inerte, denominada GTAW (Gas Tungsten Arc Welding)

4 - Soldadura por arco sumergido o SAW (Submerged Arc Welding)

El desarrollo del presente trabajo se llevó a cabo utilizando los procesos SMAW y GMAW que son los de mayor aplicación a escala industrial, por su alta productividad, versatilidad para la unión metalúrgica de grandes secciones

1.2 - Características Principales de los Procesos de Soldadura SMAW y GMAW

- Fundamentos teóricos (3)

Las constantes y nomenclatura que se utilizan para el estudio de la física y la metalurgia de la soldadura (Anexo I), son las siguientes:

$k = 0.028 \text{ (J/ mm.s.}^\circ\text{C)}$ Conductividad térmica del acero al carbono

$\rho C = 0.0044 \text{ (J / mm}^3 \cdot ^\circ\text{C)}$ Calor específico del acero

ρ : Densidad (g/ mm³)

$K = k/\rho C \text{ (cm}^2\text{/s)}$ (difusividad térmica)

T_{pic} : Máxima temperatura a una distancia x de la línea de fusión (°C)

T_o : Temperatura inicial del material a soldar (°C)

T_m : Temperatura de fusión (Líquidus) (°C)

C : Calor específico del metal (J/g.°C)

h : Espesor del material a soldar (mm)

v : Velocidad de avance del electrodo (mm/s)

τ : Espesor relativo (adimensional)

l : longitud del cordón

H_f : Calor de fusión (J/kg)

L : Cantidad específica teórica de calor necesaria para fundir un cierto volumen de metal desde temperatura ambiente (J/mm³)

T_c : Temperatura de referencia a la cual se determina R

T_{prec} : Temperatura de precalentamiento (Sin precalentamiento T_{prec} = T_o)

S_t : Tiempo de solidificación (s)

R : Velocidad de enfriamiento (°C/s)

t : tiempo (s)

Las variables fundamentales de los procesos de soldadura de arco eléctrico SMAW y GMAW que se deben tener en cuenta para su aplicación, en concordancia con las propiedades y la microestructura del acero, son las siguientes:

- Dilución

Cuando dos metales se funden en soldadura por arco, la composición química final es una mezcla de ambos, produciéndose una dilución, que expresada en porcentaje está dada por la siguiente ecuación :

$$\%D = \frac{\text{peso del metal base en la soldadura}}{\text{peso total de la soldadura}} \times 100 \quad (1.1)$$

La determinación de la dilución permite conocer la composición química de la soldadura, teniendo en cuenta que se produce una mezcla entre el electrodo y el material base. Con esta información se puede predecir el estado de la microestructura de la zona de fusión y de la zona afectada térmicamente (presencia de martensita, ferrita, perlita, etc.). También se pueden establecer las temperaturas de precalentamiento

- Eficiencia del proceso de soldadura

La energía necesaria para la soldadura por arco eléctrico es aportada por una fuente de poder. La determinación de la eficiencia de la transferencia de calor y de la fusión, posibilita el cálculo la velocidad de enfriamiento, temperatura pico (Temperatura máxima a una distancia x de la línea de fusión), velocidad de solidificación, etc. las ecuaciones son las siguientes:

$$H_{net} = \frac{E \cdot I \cdot f_1}{v} \quad (1.2) \quad f_1 : \text{Eficiencia de transferencia de calor.}$$

H_{net} : Energía aportada por el arco eléctrico

E: Tensión de la corriente eléctrica

I: Intensidad de la corriente eléctrica

v: Velocidad de avance del electrodo

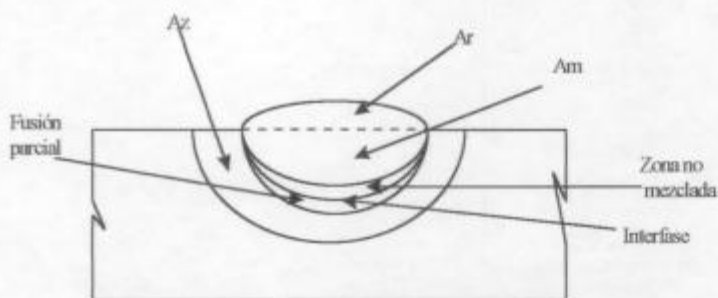
$$f_2 = \frac{Q \cdot A_w}{H_{net}} \quad (1.3) \quad f_2 : \text{Eficiencia de fusión (cantidad teórica mínima de calor del arco para la fusión, sobre la energía neta aportada)}$$

Q : Cantidad específica teórica de calor necesaria para fundir un cierto volumen de metal desde temperatura ambiente.

$$Q = \frac{(T_m + 273)^2}{300000} \text{ J/mm}^3 \quad (1.4) \quad T_m = 1550 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (temperatura de fusión del acero) (4)}$$

$$A_w = A_m + A_r \quad (A_w \text{ Area del metal base fundido})$$

Los diferentes sectores de soldadura y de la Zona Afectada Térmicamente (ZAT), se observan en la Fig. 1.1.



Ar : Area del metal de aporte

Az : Zona afectada térmicamente (ZAT)

Aw : Sección transversal de la soldadura

Fig. 1.1 - Sectores del cordón de soldadura

- Velocidad de enfriamiento de la soldadura (R)

La aplicación principal de la ecuación de velocidad de enfriamiento de la soldadura, es el cálculo de la velocidad crítica. Para cada composición química de los aceros, existe una velocidad crítica de enfriamiento. Cuando esta velocidad es superada, aparecen estructuras martensíticas en la zona afectada térmicamente,

con lo cual hay un alto riesgo de fisuración por tensiones térmicas en presencia de hidrógeno. En los casos de aceros endurecibles por transformaciones martensíticas, a partir de este concepto se determina la temperatura de precalentamiento.

- Espesor relativo (τ)

Permite determinar el modo de calcular la velocidad de enfriamiento de la soldadura, según se trate de un modelo bidimensional o tridimensional.

$$\tau = h \sqrt{\frac{\rho C (T_c - T_o)}{H_{net}}} \quad (1.5) \quad \tau < 0.75. \text{ Ecuación de R para modelo}$$

bidimensional (espesor fino)

$$\tau > 0.75 \quad \text{Ecuación de R para modelo}$$

tridimensional (espesor grueso)

- Velocidad de enfriamiento R (°C/s)

$$\text{Modelo bidimensional} \quad R = 2\pi k \rho C \left(\frac{h}{H_{net}} \right)^2 (T_c - T_o)^3 \quad (1.6)$$

$$\text{Modelo tridimensional} \quad R = \frac{2\pi k (T_c - T_o)^2}{H_{net}} \quad (1.7)$$

- Criterio $t_{8/5}$ para la determinación de la velocidad de enfriamiento

Este parámetro, está relacionado con el tiempo de permanencia del acero entre 500 y 800 ° C. Con el uso de curvas CCT (5), se puede predecir el estado de la microestructura luego de la soldadura.

$$\text{Modelo bidimensional} \quad t_{8/5} = \left(\frac{1}{4\pi k \rho C} \right) \left(\frac{H_{net}}{h} \right)^2 \left(\frac{1}{(500 - T_o)^2} - \frac{1}{(800 - T_o)^2} \right)^3 \quad (1.8)$$

$$\text{Modelo tridimensional} \quad t_{8/5} = \frac{H_{net}}{2\pi k} \left(\frac{1}{(500 - T_o)} - \frac{1}{(800 - T_o)} \right) \quad (1.9)$$

- Temperatura de precalentamiento - Ductilidad

Algunos criterios utilizados para la determinación de la temperatura de precalentamiento son los siguientes:

a - En base a Código ASME para recipientes a presión (Sección IX), Código ANSI/AWS D1.1, Código API, otros.

b - Mediante cálculo del CE, para determinación de soldabilidad.

La soldabilidad se determina calculando el Carbono Equivalente (CE %)

$$CE(\%) = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{(\%Cr + \%Mo + \%V)}{5} + \frac{(\%Ni + \%Cu)}{15} \quad (1.10)$$

Precalentamiento opcional : CE < 0.45 %

Precalentamiento 90 - 204 °C : CE 0.45% ≤ CE ≤ 0.60 %

Precalentamiento 204 - 370 °C : CE > 0.6 %

c - En base a publicaciones

d - Utilizando curvas CCT

- Temperatura máxima a una distancia x de la línea de fusión (Tpic)

Permite calcular las temperaturas máximas a las que llegaran los puntos de la ZAT ubicados a una cierta distancia de la línea de fusión. Tomando T_o como temperatura de precalentamiento o temperatura de transformación eutectoide, se puede determinar el ancho de la zona afectada térmicamente.

$$\frac{1}{T_{pic} - T_o} = \frac{\rho \cdot C \cdot h \cdot x \sqrt{2\pi e}}{H_{net}} + \frac{1}{T_m - T_o} \quad (1.11)$$

- Velocidad de solidificación de la soldadura

La velocidad de solidificación de la soldadura tiene relación con el espaciado interdendrítico, el cual es directamente proporcional a la raíz cuadrada del tiempo de solidificación, de acuerdo a lo siguiente:

$$d \propto \sqrt{St} : \text{Espaciado interdendrítico} \quad (1.12)$$

$$St = \frac{L \cdot H_{net}}{2\pi k \rho C (T_m - T_{prec})^2} \quad (1.13)$$

1.3 - Procesos de Soldadura de Arco Eléctrico

- Proceso SMAW

a - Es un proceso simple y muy versátil para la soldadura de aleaciones de base ferrosa.

b - El proceso utiliza electrodos revestidos constituidos por un núcleo de alambre y cobertura con ligante de silicato con polvo de fluoruros, carbonatos, óxidos, aleantes, celulosa, etc. Los electrodos se producen por extrusión, de

manera que luego de un recocido para el secado y endurecido de revestimiento, el núcleo queda concéntrico. El recubrimiento permite la estabilización del arco eléctrico, genera gases para la protección contra la atmósfera oxidante, aporta aleantes y produce una escoria protectora y de soporte para la soldadura.

c - El electrodo es colocado en una guía de una pinza a presión. La pinza se une a la fuente de energía a través de un cable.

d - El encendido del arco se realiza frotando la punta del electrodo contra la pieza a soldar. Luego se desplaza la pinza depositando el material.

e - El calor del arco eléctrico funde el metal base en la zona circundante, el alambre del electrodo y el recubrimiento.

f - La aleación producida por el metal base fundido, el alambre y el recubrimiento se solidifican para formar la soldadura.

g - Los electrodos se fabrican en diámetros que van desde 2 a 6 mm. Los de mayor diámetro permiten la conducción de altas corrientes con lo que es posible lograr altas velocidades de deposición, ante todo en las posiciones plana y horizontal.

h - Se utiliza una fuente de corriente constante (Fig. 1.2)

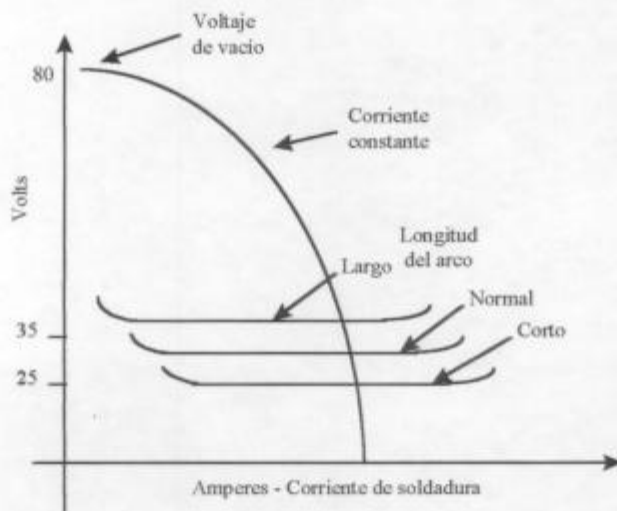


Fig. 1.2 - Curva característica de una máquina de soldar SMAW

i - Se puede depositar hasta 2 kg de material de aporte por hora.

j - Se fabrican electrodos con composiciones químicas especiales, en una amplia variedad y con relativa facilidad.

k - El proceso SMAW presenta numerosas ventajas. Los estudios de ingeniería pueden resolver fácilmente variados problemas complejos. Los equipos, en la actualidad son altamente versátiles, seguros, simples, livianos y de alta eficiencia energética (Fig. 1.3)

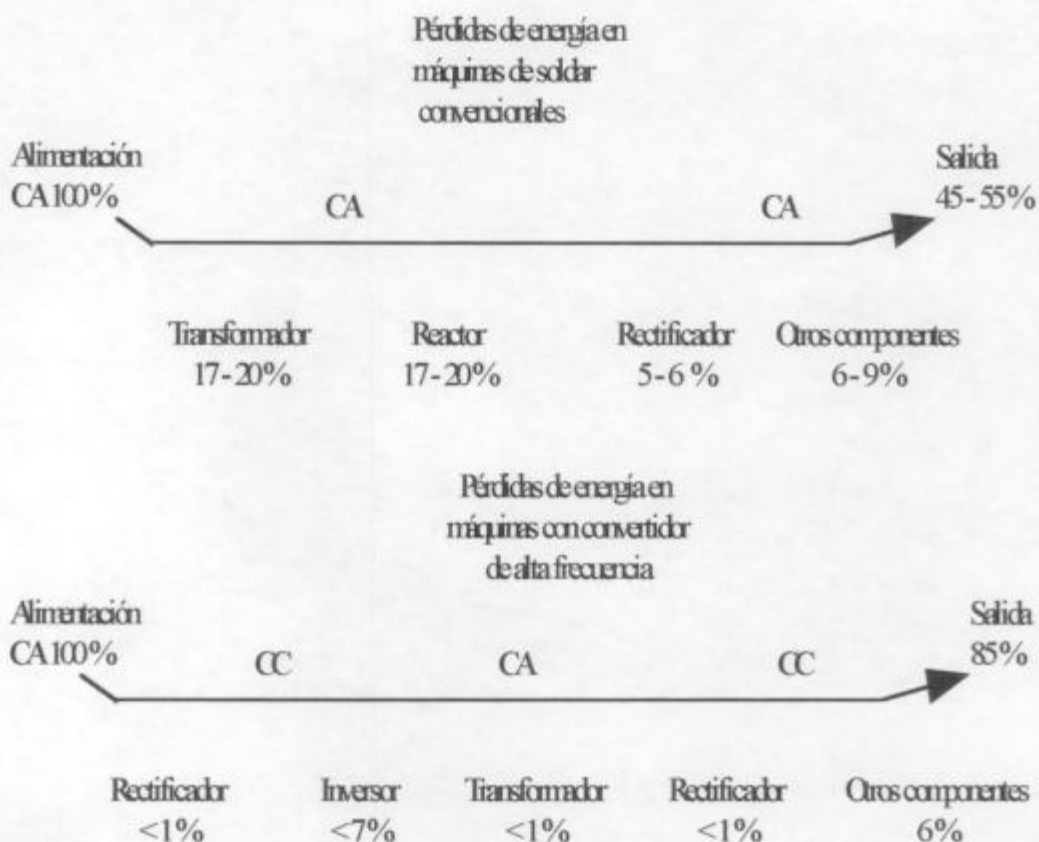


Fig. 1.3 - Eficiencia energética de máquinas de soldar convencionales y con convertidor de alta frecuencia

l - Se puede utilizar corriente continua o corriente alterna. La fuente de poder se conecta al primario que provee alrededor de 10 kw. Existen equipos portátiles, de manera que la soldadura se puede realizar en lugares de difícil acceso, sin depender de la fuente energética

m - El proceso SMAW aunque es muy clásico, es de amplio uso en la industria naval, del petróleo, de grandes reactores para la industria en general y en los casos de mantenimiento y reparación. Dado que se puede aplicar en todas las posiciones, en varios aspectos presenta ventajas frente a otros procesos.

n - El inconveniente fundamental del proceso SMAW, es la aptitud del operador. Por esta causa existen organizaciones de alta complejidad para entrenamiento y calificación de soldadores. Periódicamente estos operarios deben revalidar el nivel de calificación, de manera de lograr soldaduras aptas, desde el punto de vista de la defectología y la terminación. La regularidad y aptitud del operador se controla por ensayos no destructivos (END), ensayos destructivos y metalográficos (en particular por macrografía), de manera de verificar incluso el plan de pasadas previsto en los procedimientos.

En la Fig. 1.4, se observa el esquema del proceso SMAW

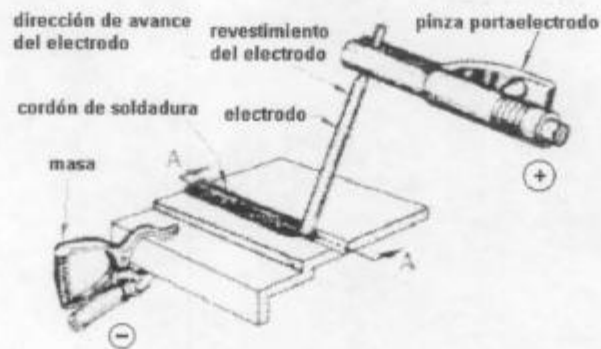


Fig. 1.4 - Esquema de proceso SMAW

- Proceso GMAW automático

Las características del proceso GMAW empleado para la construcción de las probetas son las siguientes:

a - Se utilizó una máquina automática (Fig. 1.5)

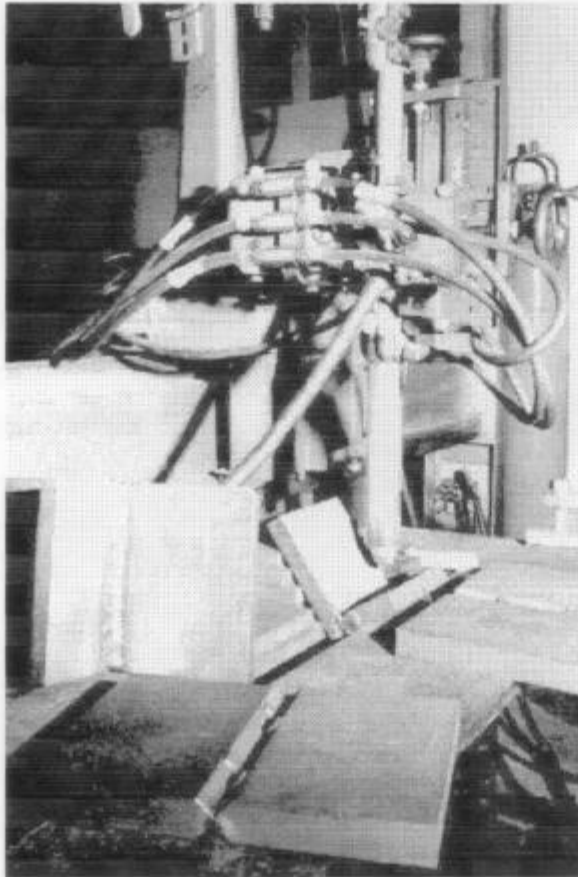


Fig. 1.5 - Máquina automática GMAW

b - Se emplea alambre macizo como material de aporte y terminal para el arco eléctrico.

c - El alambre se alimenta en forma continua empleando un selector de velocidades para regular la cantidad de material aportado.

d - Se utiliza gas activo (CO_2) o inerte (Argón), para la protección del arco y de la soldadura contra la oxidación.

e - La fuente de poder es de tensión constante (Fig. 1.6)

f - La transferencia de metal se puede realizar por spray, por arco pulsado, por corto circuito o de tipo globular. Para el caso de transferencia por spray se requieren altas corrientes.

g - Para la transferencia globular y por corto circuito se utiliza gas CO_2 , mientras que para transferencia por spray y arco pulsado se emplea Argón.

h - El proceso permite depositar 5/7 kg de material aporte por hora.

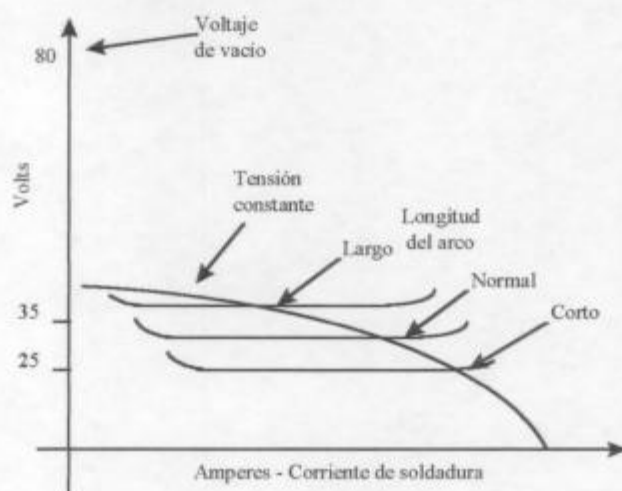


Fig. 1.6 - Curva característica de una máquina de soldar GMAW

i - En procesos automáticos como el empleado para el estudio, el control de la velocidad de avance de la torcha, la alimentación uniforme del alambre de aporte y el mantenimiento de una altura constante del arco son la principales ventajas.

j - Existen fuentes de poder con alta eficiencia energética, con elevador de frecuencia. De esta manera, los equipos semiautomáticos tienen un peso reducido (20/30 Kg)

En la Fig. 1.7 y Fig. 1.8 se presentan los gráficos para la regulación de la cantidad de material de aporte y la velocidad de avance del arco eléctrico

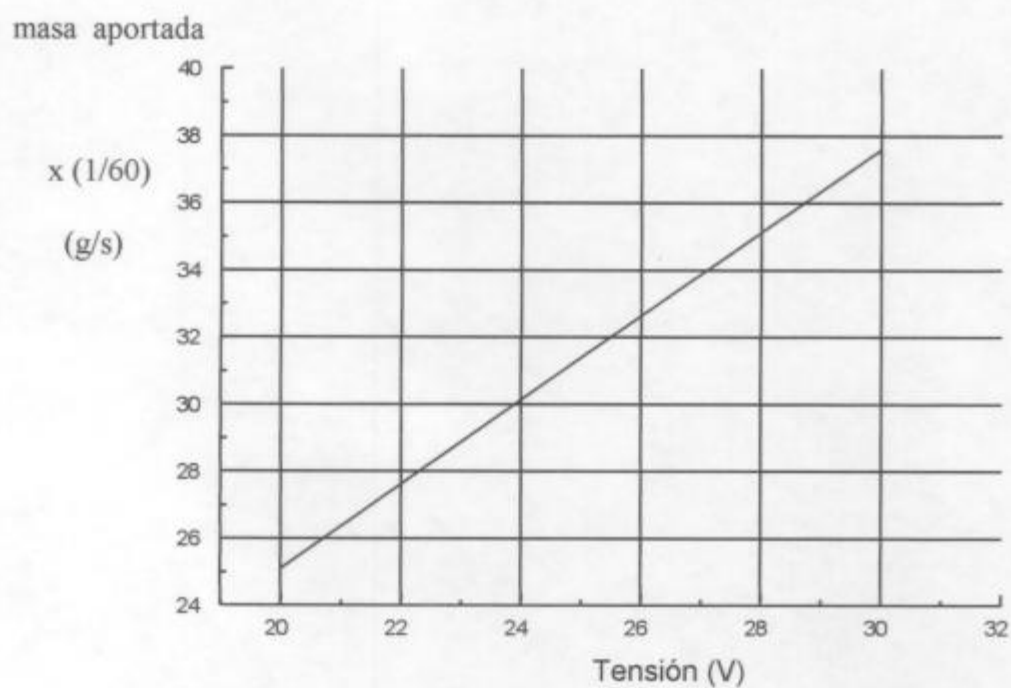


Fig. 1.7 - Regulación de la alimentación del electrodo
Proceso GMAW automático

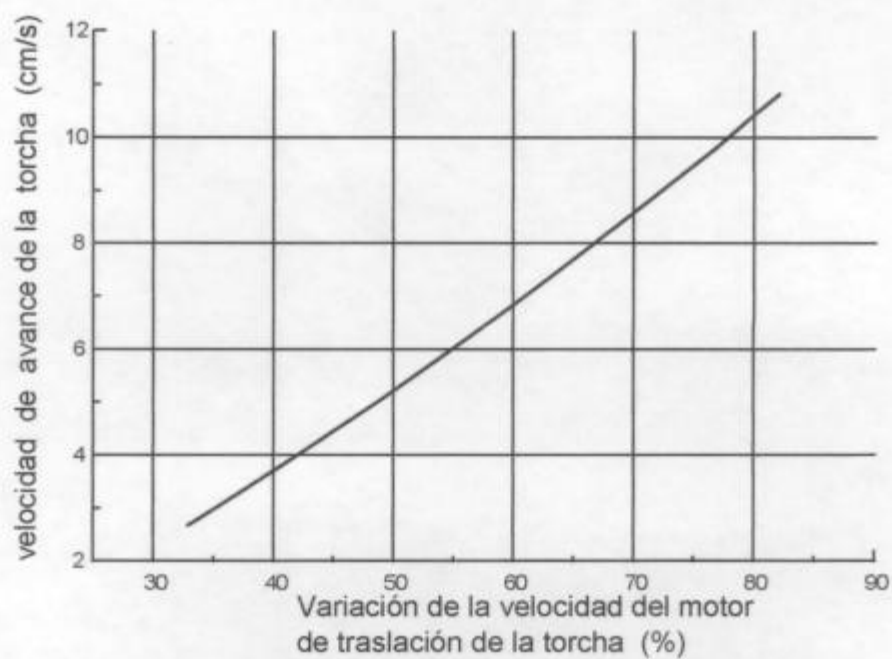


Fig. 1.8 - Regulación de la velocidad de avance
del arco eléctrico - Proceso GMAW automático

1.4 - La Soldadura, Microestructura y Propiedades del Acero

- Fundamentos

La estructura cristalina del acero es compleja. Cuando el acero se encuentra en estado líquido a alta temperatura, no presenta un ordenamiento atómico regular. Los átomos se mueven libremente dentro de los límites en que se encuentra confinado el acero líquido. Esto se debe a la alta energía térmica involucrada en el proceso de fusión. En la solidificación, dado que la temperatura disminuye rápidamente, el metal se enfría de manera que los átomos pierden movilidad adoptando un patrón definido. Este patrón es una red tridimensional geométrica, sobre la que se forma la estructura cristalina del acero, que define sus propiedades físicas.

El acero con 0.45 % de C, es una aleación intersticial Fe-C que según el diagrama de la Fig. 1.9, presenta las siguientes estructuras cristalinas durante la solidificación:

- A 1570 °C, se inicia la solidificación con la aparición de la fase Fe_{γ} , denominada austenita, cuya estructura cristalina es cúbica de caras centradas. Esta fase coexiste con el líquido.
- Por debajo de 1550 °C la austenita es la única fase presente hasta 820 °C.
- Entre 820 °C y 723 °C se encuentran presentes las fases Fe_{α} (ferrita alfa) y austenita. La ferrita alfa tiene estructura cúbica de cuerpo centrado.
- A 723 °C se produce la reacción hipoeutectoide donde coexisten la ferrita alfa, la austenita y la fase Fe_3C (Cementita), cuya estructura cristalina es ortorrómbica.
- Finalmente por debajo de 723 °C las fases presentes son ferrita alfa y el eutectotido perlita (estructura laminar de ferrita y cementita)

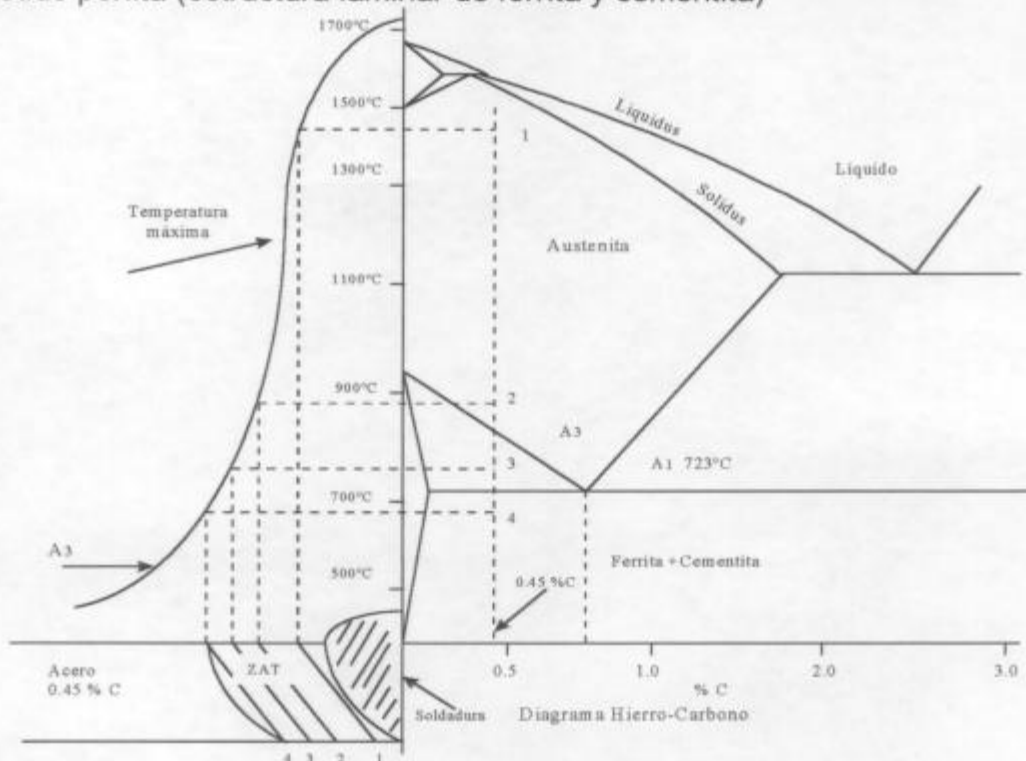


Fig. 1.9 – Relación entre la temperatura máxima de la soldadura De un acero de 0.45 %C y el diagrama Fe-C

Estudiando el diagrama de equilibrio Fe-C se determinan las microestructuras resultantes de la aplicación de procesos de soldadura y tratamientos térmicos. Para el acero de 0.45 %C, la ZAT presenta diferentes estructuras de solidificación, desde martensita hasta ferrita normalizada. El resultado del análisis de los diferentes sectores de la ZAT, es el siguiente:

El resultado del análisis de las diferentes sectores de la ZAT, es el siguiente:

- Zona 1: Esta zona cercana a la línea de fusión, es sometida a elevadas temperaturas de austenización. Se produce un fuerte crecimiento de grano austenítico (ASTM E 112 nº 4). Para altas velocidades de enfriamiento, se forma estructura martensítica, dura y frágil.

- Zona 2: Esta zona alcanza la temperatura de austenización. La estructura resultante es de grano fino. No hay tendencia a la formación de martensita. La dureza es moderada.

- Zona 3: No se alcanza totalmente la austenización (región intercrítica). La microestructura resultante está compuesta de perlita y ferrita.

- Zona 4: Esta parte no alcanza la temperatura de transformación eutectoide (723 °C). Se observa estructura ferrítica – perlítica.

El esquema y la macrografía de la unión soldada analizada se observa en la Fig. 1.10. En la Fig. 1.11, se observa la microestructura resultante.

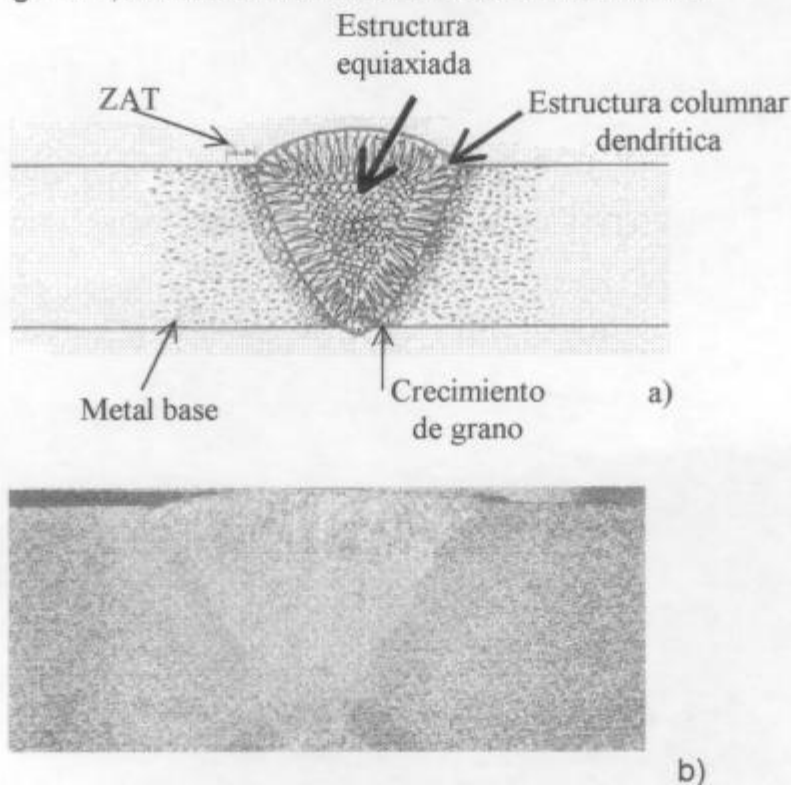


Fig. 1.10 – a) Esquema de la microestructura de la unión soldada
b) Macrografía (5x)



a)



b)



c)



d)

Fig. 1.11 – a) Microestructura del metal base (100x)
b) Microestructura de la ZAT (100x)
c) Línea de fusión (100x)
d) Material de aporte (100x)

La estructura resultante de la ZAT es compleja. Depende fundamentalmente de la velocidad de enfriamiento de la soldadura, que está relacionada con el tipo de acero (de bajo carbono, de medio carbono, de baja aleación, aleado, etc.) y con el proceso de soldadura empleado.

Estudiando la estructura de la unión soldada, se observan tres niveles:

a - Escala macroscópica: La estructura está asociada a las regiones que forman el cordón de soldadura y a la distribución, tamaño y forma de los granos.

b - Escala microscópica: Tiene relación con la microsegregación y con la presencia del nivel de inclusiones no-metálicas que se observan por microscopía óptica.

c - Escala submicroscópica: Está relacionada con la estructura de las fases presentes y con los defectos que se presentan con dicha microestructura (vacancias, dislocaciones, etc.).

De acuerdo a lo expuesto, las discontinuidades estudiadas en este trabajo se corresponden con las escalas macroscópica y en menor medida con los de la escala microscópica.

El conocimiento de la estructura tiene por objeto el control del comportamiento del acero en servicio. La metodología de estudio aplicada para el caso habitualmente es la siguiente:

Variables operativas - Estructuras - Propiedades

De esta forma, el conocimiento de las características microestructurales primarias y secundarias, sirve para determinar los mecanismos que actúan en las transformaciones de fase y su efecto sobre las propiedades.

La observación de la macrografía de una soldadura (Fig. 1.10.b), permite observar inclusiones no-metálicas, número de pasadas de soldadura, estructura de los granos, dimensiones de la zona afectada térmicamente (ZAT) y discontinuidades microscópicas. El procedimiento para la obtención de una macrografía es simple y a través de su análisis se pueden comprender la mayoría de los fenómenos asociados con la física y la metalurgia de la soldadura.

En la etapa inicial del estudio, este procedimiento se utilizó para comprobar la eficacia de las técnicas de construcción de las probetas.

La teoría de solidificación es extensa y compleja. Su tratamiento constituye una especialidad abordada por investigadores de alta formación científica y tecnológica. Los aspectos mas relevantes de estos estudios están relacionados con las inclusiones no-metálicas exógenas originadas por la interacción de los gases atrapados (oxígeno, nitrógeno, hidrógeno), con elementos tales como Mn, Si, C, Fe, Al, P. Así se tiene que por el agregado de desoxidantes al metal líquido, se forma Al_2O_3 , SiO_2 , $MnSiO_3$, etc.

La termodinámica de las reacciones metal-escoria y metal-gas es muy conocida. La reacción de desoxidación Si-Mn, es ampliamente utilizada en la soldadura. Si bien la desoxidación con Si es mejor que con Mn, la desoxidación con ambos elementos disminuye el oxígeno residual en solución.

El control del crecimiento y comportamiento de las inclusiones también ha sido estudiado. Así por ejemplo se debe lograr la flotación de las inclusiones para que sean removidas por la escoria.

La morfología de las inclusiones exógenas varía en base a la cinética de las interfaces, la energía superficial relativa y la viscosidad.

Las inclusiones que se forman por las reacciones químicas en la soldadura, pueden aparecer en la estructura final si no son removidas por la escoria. Existe una diferencia clara entre las inclusiones originadas por el proceso de soldadura y aquellas atrapadas por una incorrecta limpieza de los cordones previamente realizados.

Los fundentes utilizados a través del revestimiento de los electrodos posibilitan el control del tenor de inclusiones en la soldadura. Es conveniente el uso de fundentes de alto grado de basicidad para lograr un bajo contenido de inclusiones. La basicidad del fundente se puede formular según la necesidad de eliminación de las inclusiones.

La porosidad es otra particularidad de la soldadura. Se trata de cavidades atrapadas en el seno de la soldadura por la evolución de gases disueltos durante la solidificación. Los gases disueltos en la soldadura son oxígeno, nitrógeno e hidrógeno, todos solubles en grandes cantidades en el acero líquido y en menor proporción en el acero sólido.

Por el movimiento del acero líquido, los gases escapan a la atmósfera. La formación de poros está relacionada con la presencia de gases atrapados H_2 , O_2 , N_2 y con las reacciones químicas que producen CO , H_2O , SO_2 . La falta de llenado de la contracción del acero cuando solidifica, también produce porosidad.

La forma, tamaño, distribución y ubicación de la porosidad es variable. Por ejemplo las de tipo esférico aparecen en regiones asociadas con bandas de soluto en el espaciado interdendrítico.

Las variables fundamentales que hacen a la presencia de poros son: Composición y flujo de los gases de protección; impurezas; humedad; limpieza para la eliminación de grasas y pinturas; velocidad de soldadura; tensión; corriente.

1.5 - Defectología Característica de los Proceso de Soldadura de Arco Eléctrico (6)

1.5.1 - Aspectos generales

En los sectores de soldadura (cordón de soldadura y zona afectada térmicamente), se producen diferentes tipos de discontinuidades en la microestructura del acero. Unicamente las discontinuidades que representan un riesgo para la integridad del componente en cuestión, se consideran defectos. Según los códigos y procedimientos de la ingeniería, estos defectos deben ser eliminados o sometidos a recuperación, hasta cumplir con las especificaciones técnicas preestablecidas.

Dado que la asignación de la categoría de defecto implica la obligatoriedad de rechazar la pieza o proceder a su reparación, recientemente en los centros de alta tecnología se acordó utilizar el término de falla o discontinuidad en lugar de defecto.

Sobre la base de lo preestablecido, las discontinuidades que se presentan en la Zona del Metal Fundido y en la ZAT de un componente soldado, están relacionadas con el proceso de soldadura empleado y con las propiedades del material base y material de aporte. El análisis de la incidencia de estas discontinuidades se realiza teniendo en cuenta las solicitaciones que debe soportar el componente en cuestión. Así por ejemplo, para un componente soldado sometido a compresión ciertas discontinuidades pueden no alcanzar la categoría de defectos. Las mismas discontinuidades pueden ser críticas en casos de solicitaciones a la tracción, impacto o torsión. Una discontinuidad catalogada como defecto severo para un componente soldado de acero SAE 4140, puede resultar inocua para cordones de soldadura de acero estructural tipo St 37 (calidad clasificada en norma DIN 17200 - Acero con 370 MPa mínimo de Resistencia Máxima a la Tracción con aproximadamente 0.1 % de C y 0.4 % de Mn).

Ningún componente fabricado por procesos de soldadura por arco eléctrico se puede obtener en un estado tal que carezca de discontinuidades. Por lo tanto existen standards para su clasificación según su forma, tamaño, orientación y grado de incidencia sobre la integridad de la soldadura y del componente en cuestión.

Otro aspecto a tener en cuenta es la incidencia de los operadores y equipos de soldadura. El entrenamiento de soldadores es muy importante, teniendo en cuenta que el proceso SMAW es extensamente aplicado sobre la base de su versatilidad.

1.5.2 - Clasificación de las discontinuidades de la soldadura

Según las normas y códigos vigentes para los componentes soldados, las discontinuidades se clasifican de acuerdo a lo siguiente:

- Discontinuidades relacionadas con el diseño.
- Discontinuidades relacionadas con el proceso de soldadura
- Discontinuidades relacionadas con las características metalúrgicas

Las discontinuidades debidas al diseño, comprenden aquellos casos donde se presentan cambios de sección, tipos de soldaduras especiales de alta resistencia al desgaste, etc.

Las discontinuidades relacionadas con el proceso de soldadura, son las de interés para el presente estudio. La clasificación de este tipo de discontinuidades es el siguiente:

- Inclusiones de escoria. Son compuestos no-metálicos atrapados en el cordón de soldadura o entre el cordón y el material base.

- Porosidad. Son cavidades que se forman por gases atrapados durante la solidificación.

- Socavado. Es una zona fundida que puede presentarse en el flanco, en la raíz o en el cordón de la junta. Suele presentarse en todo tipo de uniones.

- Solapado. Es una protuberancia de sobrematerial de aporte que se presenta en una zona adyacente al flanco o a la raíz de la junta. Este tipo de discontinuidad cuando es catalogado como defecto reparable siempre que sea posible el acceso a la zona que contiene a dicho defecto.

- Rechupes. Son cavidades que se forman por la contracción del material cuando solidifica.

- Falta de fusión. Situación en la que no se produce una fusión completa y en consecuencia no se logra una unión metalúrgica. Esta discontinuidad se presenta entre el cordón y el material base, en la junta.

- Falta de penetración. Se produce cuando luego de aplicar la soldadura, no se logra completar la unión de las piezas en la zona de raíz de la junta.

- Cráter. Es una depresión, con fisuras que se presenta en la terminación del cordón.

- Proyecciones. Son partículas de material de aporte, proyectadas el por arco eléctrico.

Las discontinuidades mas importantes de carácter metalúrgico son:

- Fisuras

- Segregación. Es una distribución heterogénea de elementos de aleación e impurezas que se produce en la zona de soldadura.

- Desgarre laminar. Son fisuras que se generan en el metal base o ZAT, debido a una falta de ductilidad del acero.

1.5.3 - Grado de severidad de las discontinuidades.

Considerando el grado decreciente de severidad de las discontinuidades, se tiene el siguiente orden: 1ro. Fisuras; 2do. Falta de fusión y falta de penetración; 3ro. Inclusiones; 4to. Porosidad. Las tres primeras son de tipo planar y las dos últimas son de tipo volumétrico. Las discontinuidades planares son mas peligrosas que las de volumen, porque pueden actuar como concentradores de tensiones.

Por otra parte, las discontinuidades internas son mas peligrosas que las superficiales dado que resulta dificultosa su detección. Las discontinuidades superficiales presentan la ventaja de poder ser detectadas y reparadas con mayor facilidad.

1.5.4 - Formación de discontinuidades en uniones soldadas.

La aparición de las discontinuidades está relacionada con el tipo de proceso de soldadura aplicado, con el diseño de la junta, con el material utilizado y con las condiciones de trabajo y medio ambiente.

Para el desarrollo del presente trabajo, se consideran de importancia las discontinuidades relacionadas con los procesos de soldadura. Dado que los procesos de soldadura por arco eléctrico utilizados fueron SMAW (shielded metal arc welding o soldadura manual con electrodo revestido) y GMAW automático (gas metal arc welding o soldadura por arco con protección gaseosa), las discontinuidades típicas que se generan en la soldadura del acero, son las siguientes:

a - Proceso SMAW

- Inclusiones de escoria (I)
- Porosidad (P)
- Falta de penetración (LOP)
- Falta de fusión (LOF)
- Socavado (U)

b - Proceso GMAW automático

- Falta de fusión (LOF)
- Falta de penetración (LOP)
- Inclusiones de escoria (I)
- Porosidad (P)

De acuerdo a lo indicado anteriormente, las fisuras, que están más estrechamente relacionadas con las características del material, no son originadas

por los procesos de soldadura. La presencia de fisuras presenta el mayor nivel de riesgo para la integridad de la unión soldada. Por este motivo, este tipo de discontinuidad es intensamente estudiado por el campo de los ensayos destructivos y los ensayos no destructivos.

Durante los proceso de soldadura SMAW y GMAW, es muy difícil generar fisuras en la soldadura de manera controlada. Normalmente para el estudio de la detectabilidad de fisuras internas por ensayos no destructivos, en particular por ultrasonido, se recurre a la técnica de implante con proceso SMAW, con lo que se agrega otra variante desfavorable dado que las transformaciones físicas y químicas producidas presentan un determinado grado de atenuación de la presión acústica, que disminuye la detectabilidad.

1.5.5 - Condiciones de proceso y operativas para la inducción de discontinuidades características en soldadura por arco eléctrico SMAW y GMAW automático.

a - Falta de fusión

La forma de este tipo de discontinuidad se observa en la Fig. 1.12

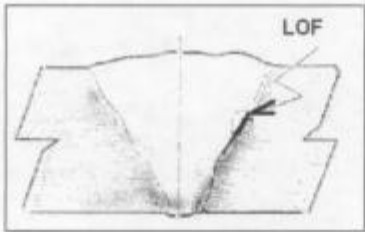


Fig. 1.12 - Falta de fusión en junta tipo V.

En el siguiente esquema se indican las variables que dan lugar a la presencia de este tipo de discontinuidades (Fig. 1.13).



Fig. 1.13 - Causas que originan discontinuidades de tipo LOF.

*Variables utilizadas para inducir LOF

b - Falta de penetración.

Esta tipo de discontinuidad se observa en la Fig. 1.14

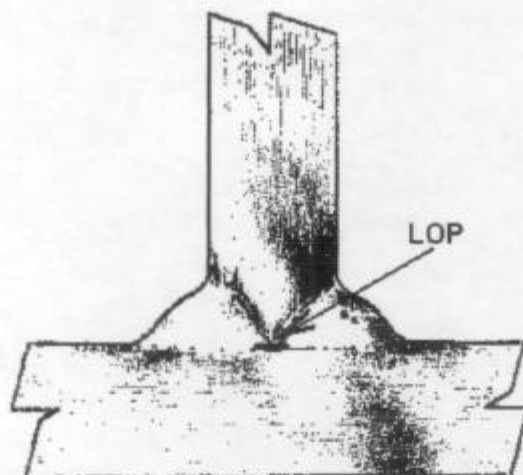


Fig. 1.14 - Falta de penetración en junta tipo K.

En la Fig. 1.15, se indican las variables que originan este tipo de discontinuidades.

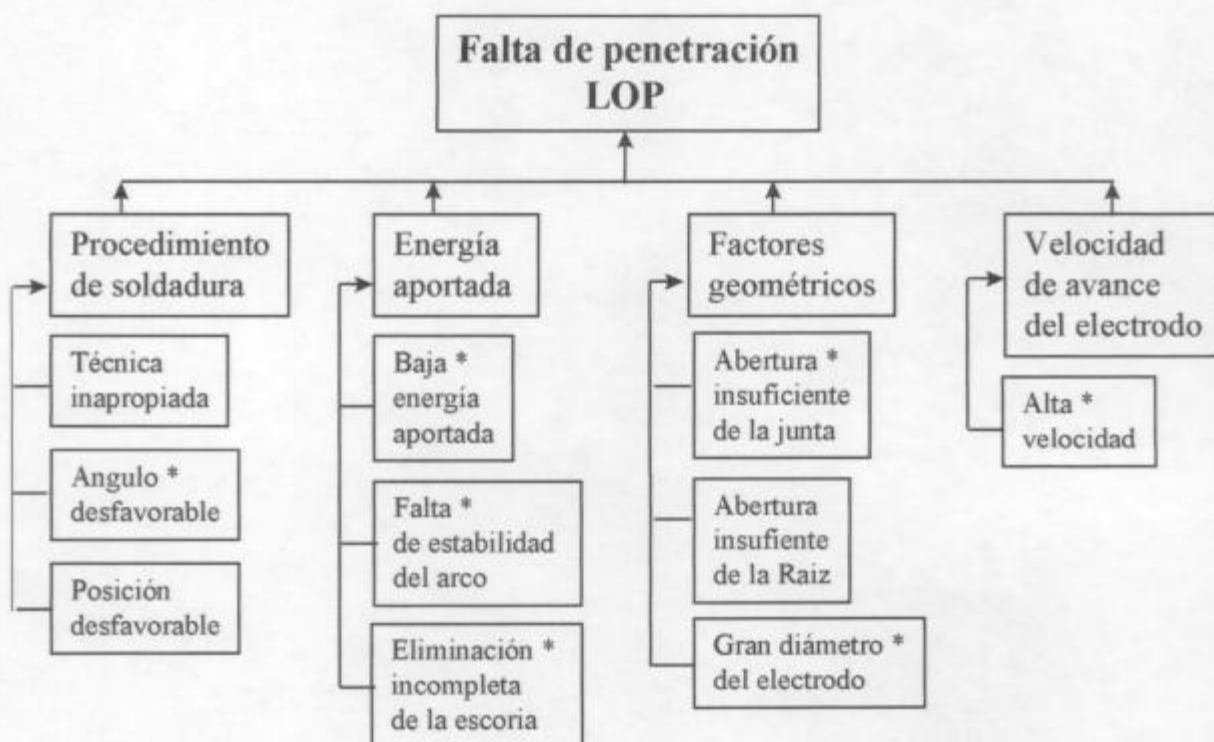


Fig. 1.15 - Origen de discontinuidades de tipo LOP.

* Variables utilizadas para inducir LOP

c - Porosidad

En la Fig. 1.16 se observan porosidades inducidas en procesos de soldadura por arco eléctrico.

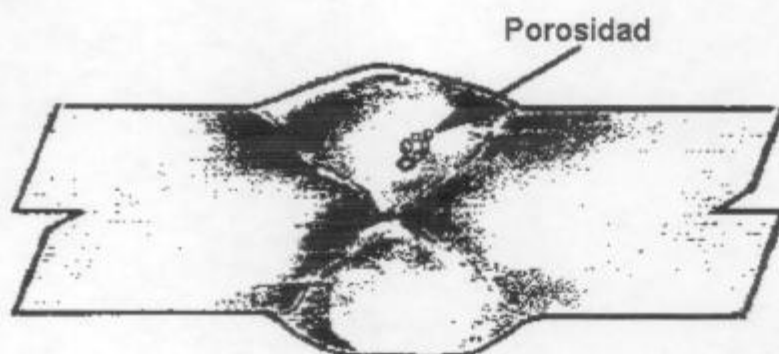


Fig. 1.16 - Porosidad en junta tipo X

Las causas que originan porosidad en uniones soldadas se describen en el esquema de la Fig. 1.17.

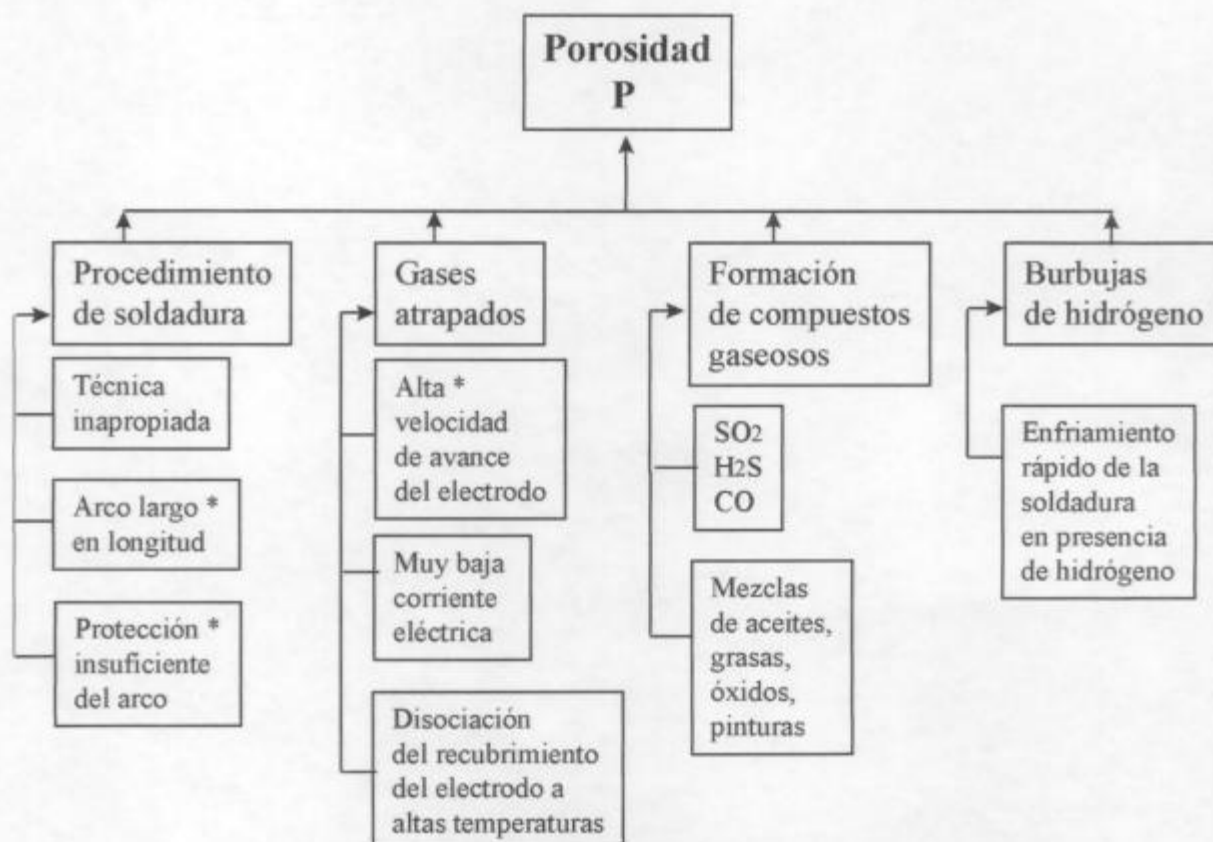


Fig. 1.17 - Causas que ocasionan la presencia de porosidad

* Variables empleadas para inducir porosidad

d - Inclusiones de escoria

En la Fig. 1.18 se observan inclusiones inducidas en proceso de soldadura por arco eléctrico SMAW.

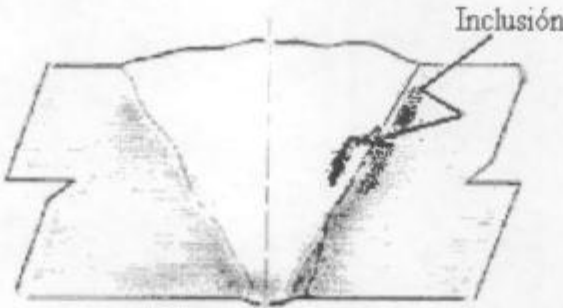


Fig. 1.18 – Inclusiones en junta tipo V

Las causas que originan la presencia de este tipo de discontinuidades se indica en la Fig. 1.19.

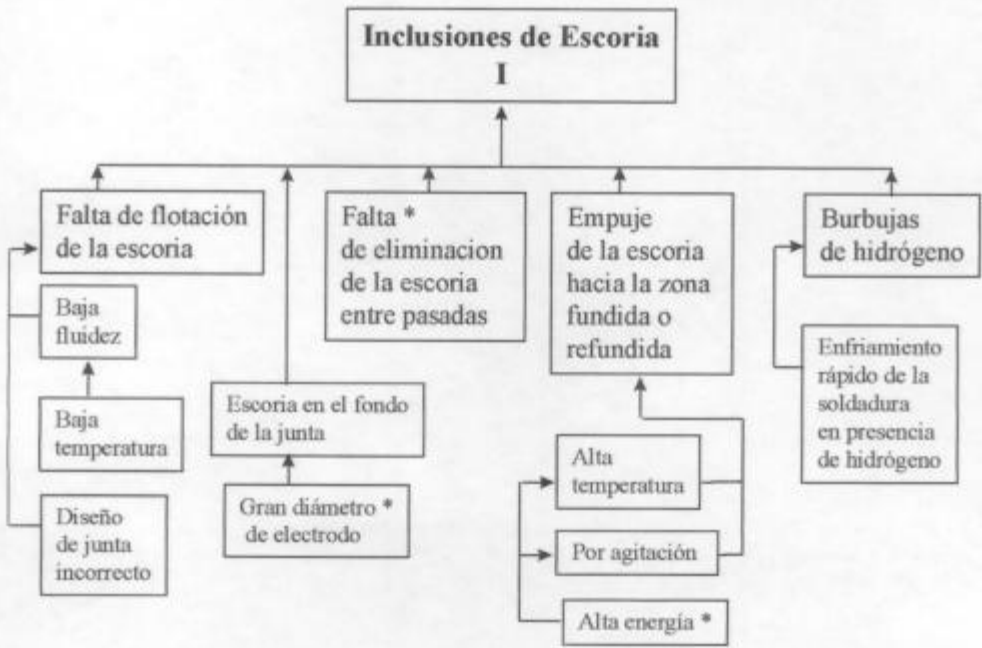


Fig. 1.19 - Formación de inclusiones de escoria

* Variables utilizadas para generar presencia de escoria

2

ENSAYO DE ULTRASONIDO PARA DETECCION DE DISCONTINUIDADES EN SOLDADURA



2 - ENSAYO DE ULTRASONIDO PARA DETECCION DE DISCONTINUIDADES EN UNIONES SOLDADAS

2.1 - Generalidades

En la actualidad, los ensayos no destructivos (END) se aplican extensamente en la industria con el objeto de determinar la calidad lograda en los productos (7).

La modalidad de control 100% de la producción y la posibilidad de obtención de información de todo el volumen y la superficie de un producto, permiten determinar el nivel de calidad desde el punto de vista de la integridad, con alta precisión.

Existen varios métodos de control no destructivos, que se aplican según el problema a resolver. Algunos sirven para controlar la superficie (inspección visual, tintas penetrantes, partículas magnéticas, corrientes inducidas), otros para analizar la parte subsuperficial (corrientes inducidas, partículas magnéticas) y aquellos que se utilizan para el estudio de la parte interna (radiografía y ultrasonido).

Con el avance de la tecnología en el campo de los nuevos materiales, la electrónica y la informática, se ha incrementado la fabricación de equipos de ensayos no destructivos para control de las defectología y de ciertas propiedades físicas. Por ejemplo en la producción de cerámicos, por aplicación de ultrasonido en línea de producción se puede determinar el modulo de elasticidad, que está relacionado con las propiedades mecánicas a alta temperatura (8).

Existe un gran desarrollo en equipamiento e instrumental para todo tipo de ensayos no destructivos, dado el requerimiento creciente de la ciencia y la tecnología. Una descripción de todas las técnicas y posibilidades de los ensayos no destructivos ocuparía varios volúmenes. La importancia de los END queda reflejada en las recientes aplicaciones y desarrollos en el campo de la medicina (ultrasonido, resonancia magnética, termografía), de la biología (ultrasonido, microondas), de la industria alimenticia, de la geología, etc.

La aplicación de ensayos mecánicos para el estudio y medición de propiedades mecánicas requiere de la existencia de probetas representativas del producto en cuestión. Por lo tanto este tipo de ensayos es de carácter destructivo, por lo que resulta dificultosa su aplicación en línea de producción. Esta situación justifica también la tendencia al desarrollo de los ensayos no destructivos.

En el campo del control de calidad de las uniones soldadas de aceros, el objetivo es la detección de discontinuidades.

En este trabajo, se estudia la aplicación del ensayo no destructivo de ultrasonido para la detección de discontinuidades en uniones soldadas, sobre un conjunto de probetas de acero con diferentes formas geométricas, en espesores

similares a los utilizados en otros Institutos de Ensayos No Destructivos y de Soldadura de Europa, Estados Unidos y Japón, en concordancia con las normas ANSI/AWS D.1.1-96 para aplicaciones estructurales (9) y el Código ASME-V-86 para recipientes a alta presión (10). También se han tenido en cuenta las normas ASTM relativas a la designación y estandarización de las características electrónicas del ensayo de ultrasonido, de manera de posibilitar la interacción con centros de investigación (11)

La digitalización de las señales ultrasónicas se realizó por medio de un sistema electrónico de adquisición y para el procesamiento matemático se utilizó MATLAB. La velocidad y potencia de procesamiento requerida fue soportada por una PC Pentium MMX 200.

Es importante tener en cuenta específicamente las ventajas y desventajas del ensayo de ultrasonido para comprender la razón por la que el estudio se desarrolló sobre la base de esta técnica.

Ventajas:

- Sirve para la detección de discontinuidades internas. En un medio elástico y con estructura cristalina como la del acero, es posible explorar a profundidades de mas de 3 metros con alto grado de precisión (Fig. 2.1). La detección puede considerarse instantánea si se tiene en cuenta que la velocidad del sonido cuando propaga en dirección longitudinal en dicho material es de 5920 m/s y en dirección transversal es de 3255 m/s. En consecuencia se trata de una técnica con la que se puede realizar un análisis volumétrico. La técnica de radiografía industrial (RT) también es aplicable para la detección de defectos internos, pero la radiación empleada solo puede atravesar alrededor 50 milímetros, luego de prolongados tiempos de exposición. Además este ensayo se realiza en ambientes protegidos contra la radiación dado que destruye fácilmente todo tipo de tejido orgánico.

- Existen equipos de ultrasonido portátiles livianos digitales (de aprox. 3 kg. de peso), con extensa autonomía de operación.

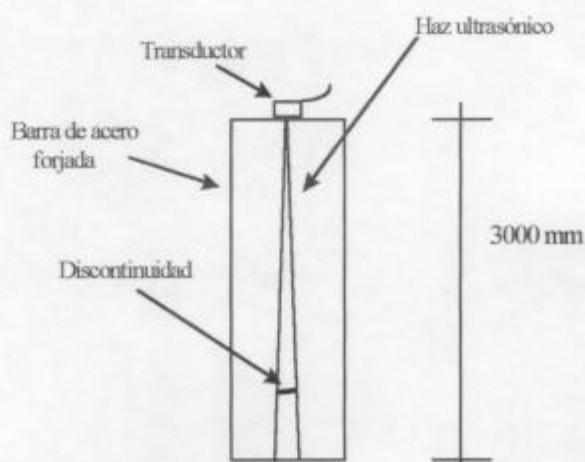


Fig. 2.1 - Profundidad de exploración del ensayo de ultrasonido

- El ensayo se realiza desde una superficie de la pieza o producto, que posibilite el acoplamiento del transductor (palpador).
- La técnica permite la detección discontinuidades pequeñas (idealmente de hasta $1/4 \lambda$ para ondas transversales)
- Existe un alto grado de compatibilidad con mecanismos automáticos de exploración (scanning), microprocesadores y computadoras

Desventajas:

- Se requiere un entrenamiento elevado y continuo de operadores. Además de la experiencia necesaria, dichos operadores deben presentar alto grado de confiabilidad. Con el desarrollo e implementación de sistemas 100 % automáticos, esta dificultad se atenúa.
- La superficie debe tener un cierto grado de rugosidad especificado en normas para lograr resultados óptimos y comprobables. Una rugosidad R_a de $6.35 \mu m$ ($250 \mu in$) (12), se considera como valor aceptable para garantizar los resultados de la aplicación del ensayo, para casos de tubos y placas de laminación y forja como los empleados en el estudio. Una superficie con dicha rugosidad se puede obtener por amolado o mecanizado basto (∇) (13). Diversos tipos de acoplantes (grasas, aceites y agua), se emplean en el ensayo de ultrasonido. Según la rugosidad de la pieza a ensayar, existe disponibilidad de acoplantes para cubrir un rango de 5 a $400 \mu in$ (0.13 a $10.16 \mu m$) (14)

2.2 - Propagación de las Ondas Ultrasónicas (15)

2.2.1 – Aspectos generales

Para la aplicación del ultrasonido en la detección de discontinuidades internas y externas, se requiere un campo de energía como el que generan las ondas elastomecánicas. En consecuencia el sonido es energía impulsada por una onda elastomecánica (acústica).

La luz se propaga a través de una onda y también en el vacío, en cambio el sonido requiere de la presencia de un medio para propagarse. La propagación del sonido puede variar según las características de medio con que interactúa, de manera que hay propagación de ondas y no del medio.

Para visualización del fenómeno clásicamente se utiliza el modelo del cuerpo elástico de resortes y esferas rígidas como el que se observa en la Fig. 2.2

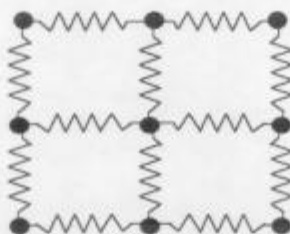


Fig. 2.2 - Modelo de cuerpo elástico

Los medios poseen un estado de inercia que se debe estimular para alterar dicho estado inicial, de manera que el ciclo que se cumple es el siguiente:

Estático - Movimiento - Vibración.

La energía de la onda ultrasónica disminuye en forma variable a medida que se propaga a través del acero. La pérdida de energía se transforma en calor según el tipo de material. Como resultado del fenómeno, la velocidad de propagación se hace característica para cada material. La interpretación física del fenómeno se puede realizar mediante la Fig. 2.3

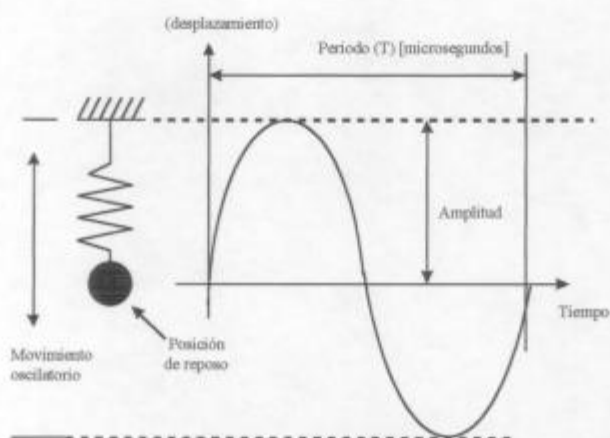


Fig. 2.3 - Ciclo de ondas ultrasónicas

Con el transcurso del tiempo se produce una amortiguación de la onda (Fig. 2.4)

La cantidad de ciclos por unidad de tiempo, se denomina frecuencia (f). La unidad de medida es el Hertz (Hz), que equivale a un ciclo por segundo. De esta forma se tiene la siguiente ecuación:

$$f = 1/T \quad (2.1)$$

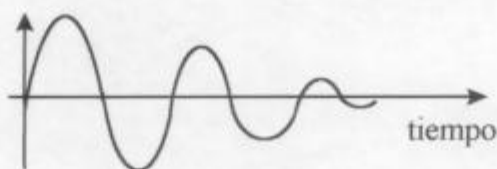


Fig. 2.4 - Atenuación de una onda sónica

En la aplicación del ultrasonido se utilizan también los múltiplos KHz y MHz.

El ultrasonido está constituido por ondas elásticas con $f > 20$ KHz, mientras que el sonido es audible en el rango de frecuencias de 16 Hz a 20 KHz. Además de la frecuencia, se debe tener en cuenta la intensidad de las ondas acústicas.

Las ondas se originan al desplazarse una partícula de su posición normal en un medio elástico, oscilando alrededor de su posición de equilibrio (Fig. 2.5). Dado que se trata de un medio elástico, la energía de la excitación se transmite de una partícula a otra avanzando a través del material. Es decir que la propagación de la onda produce un transporte de energía y no de masa. Por tratarse de un medio elástico, las fuerzas elásticas restauran las posiciones de equilibrio de las partículas desplazadas por la excitación.

Los materiales que presentan gran poder de absorción, son poco sensibles a la propagación de las ondas acústicas

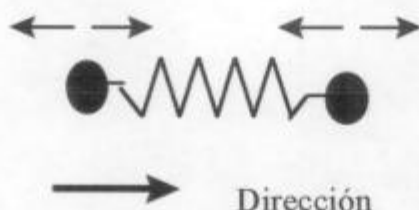


Fig. 2.5 - Dirección de propagación

En el estudio de reflectores internos, el modo de vibración de las ondas ultrasónicas utilizadas puede ser longitudinal o transversal. En el caso de una onda longitudinal, la dirección de propagación coincide con el sentido de la vibración.

En el caso de ondas transversales, las partículas vibran perpendicularmente a la dirección de propagación

Si c es la velocidad de propagación del ultrasonido, por definición de la velocidad se tiene lo siguiente:

$$c = \lambda/T = \lambda \cdot f \quad (2.2) \quad (16)$$

2.2.2 – Vibraciones libres, vibraciones forzadas y resonancia

Vibraciones libres (15)

Se considera el modelo elástico, para una masa M de la partícula, que es desplazada una amplitud y_0 , de manera tal que el enlace (resorte), es deformado dentro del límite elástico y luego es restaurado. En ausencia de amortiguamiento esta situación se puede representar como una vibración armónica simple, con una frecuencia $f_r = \omega_r/2\pi$, con $\omega_r = (MC_m)^{-1/2}$ (2.3) (C_m : Desplazamiento de la partícula por unidad de fuerza de restauración). Para este caso la ecuación de movimiento es:

$$M(d^2y/dt^2) + y/C_m = 0 \quad (2.4). \text{ La solución de esta ecuación es:}$$

$y = y_0 \cos \omega_r t$ (2.5); (y_0 : amplitud del desplazamiento de la partícula de masa M , y la derivada con respecto al tiempo es $u = u_0 \sin \omega_r t$)

En la práctica, por efectos de la fricción se produce una amortiguación, de manera que la amplitud de las oscilaciones decrece con el tiempo (Fig. 2.6)

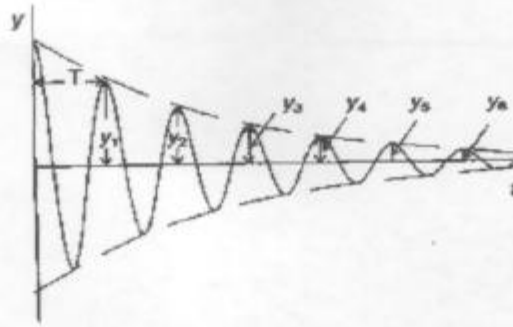


Fig. 2.6 - Onda amortiguada. Desplazamiento de la amplitud con el tiempo

Para pequeñas amortiguaciones las fuerzas de fricción son proporcionales a la velocidad, con la constante de proporcionalidad R_m , (Resistencia mecánica). Por lo tanto la ecuación 2.4, es reemplazada por la siguiente:

$$M(d^2y/dt^2) + R_m(dy/dt) + y/C_m = 0 \quad (2.5).$$

En este caso la frecuencia es menor que la correspondiente a la ecuación 2.4, pero como la diferencia es despreciable, se puede ignorar. De esta forma, la solución de primer orden de la ecuación 2.5 es:

$$y = y_0 \exp. (-a_1 t) \cdot \cos \omega_r t \quad (2.6) \text{ Con } a_1 = R_m/2M$$

La representación de esta ecuación para amortiguación finita se observa en la Fig. 2.6. Las amplitudes de los sucesivos picos está dada por $y_0, y_1, y_2, \dots, y_n$ a $0, T, 2T, \dots, nT$, respectivamente, siendo $T = 1/f_r$ (T : Período; n : número entero)

Vibraciones forzadas (15)

Cuando una fuerza periódica $F = F_0 \sin \omega t$, con frecuencia $f = \omega/2\pi$, es aplicada a una masa, las oscilaciones se producen a esta frecuencia. La ecuación de movimiento es la siguiente:

$$M(d^2y/dt^2) + R_m(dy/dt) + y/C_m = F_0 \sin \omega t \quad (2.7).$$

En condiciones estables, la velocidad u está dada por:

$$u = F/[R_m + j(\omega M - 1/\omega C_m)] \quad (2.8), \text{ con } j = (-1)^{1/2}, \text{ y la amplitud de la velocidad es: } u_0 = F_0/[R_m^2 + (\omega M - 1/\omega C_m)^2]^{1/2}. \quad (2.9)$$

Las ecuaciones 2.7; 2.8 y 2.9, son idénticas en forma a las que representan un circuito eléctrico del tipo LRC, con una resistencia R , una inductancia L y una capacitancia C , conectadas en serie, en un circuito de corriente alterna, con una tensión V . De esta manera, R_m, M, C_m y F , son los análogos de R, L, C y V , respectivamente.

y es equivalente a la carga eléctrica Q , mientras que u es equivalente a la corriente i .

El cociente F/u se denomina impedancia mecánica:

$Z_m = F/u$ (2.10). Según 2.8, se trata de un número complejo y puede expresarse como $Z_m = R_m + j.X_m$ (2.11). Aquí $X_m = (\omega M - 1/\omega C_m)$, es la reactancia mecánica, con fase $\tan \phi = X_m/R_m$; amplitud de la velocidad $u_0 = F_0/|Z_m|$.

Resonancia (15)

En la figura 2.7, se observan las curvas que dan la relación entre la amplitud de la velocidad y la frecuencia angular, considerando un valor constante F_0 y diferentes valores de R_m . La amplitud de la velocidad alcanza el máximo valor a una frecuencia $\omega_r/2\pi = (MC_m)^{-1/2}$, de manera que cuando la reactancia mecánica es cero, se produce la resonancia. La calidad de la resonancia que mejora con el aumento de altura y la disminución del ancho de la curva, se describe mediante el factor de características mecánicas Q_m , el que se define de acuerdo a lo siguiente:

$Q_m = \omega_r M/R_m = \pi/\delta$ ($\delta = y_0/y_1 = y_1/y_2 = \dots = y_{n-1}/y_n$; es la función de decrecimiento logarítmico observado en la Fig. 2.6).

Para menores valores de R_m , aumenta Q_m y los picos de las curvas de la Fig. 2.7 se hacen más agudos. Q_m puede expresarse alternativamente también como $Q_m = \omega_r/(\omega_2 - \omega_1)$. En esta ecuación ω_2 y ω_1 representan la frecuencia angular a ambos lados de ω_r , a la cual el valor de la amplitud de la velocidad es reducido a $1/\sqrt{2}$ de su máximo valor.

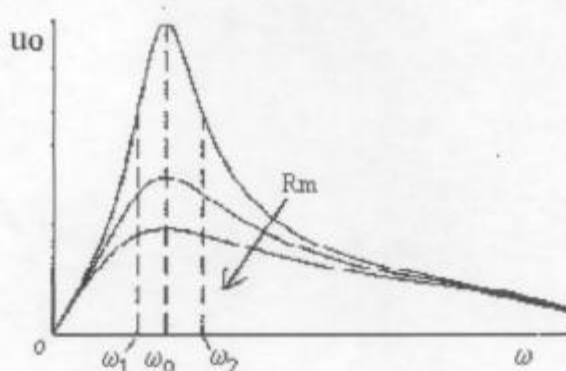


Fig. 2.7 - Variación de la amplitud de la velocidad u_0 , con la frecuencia angular ω , para vibraciones mecánicas forzadas.

En el caso del ultrasonido, la energía eléctrica generada por el instrumento es convertida en ondas ultrasonoras y viceversa por medio de un transductor electroacústico. De esta manera los transductores pueden comportarse como receptores y emisores simultáneamente.

La emisión de las ondas ultrasónicas forma un frente de ondas. El modelo que se estudia para comprender la física del ultrasonido, es el de propagación de ondas planas, aunque en realidad se generan pulsos de ondas esféricas desde una fuente puntual remota, situada en el centro de una esfera.

2.2.3 - Movimiento de ondas planas (15)

El movimiento de ondas planas está dado por una ecuación del tipo 2.5

$$y = y_0 \cos \omega t \quad (2.12)$$

Para un tiempo de un período T , durante el cual la fase cambia 2π , las ondas viajan una distancia $\lambda = cT$, donde λ es la longitud de onda. La ecuación 2.12 queda de la siguiente forma:

$$y = y_0 \cos 2\pi(t/T - x/\lambda) \quad (2.13)$$

Si se define a $k = 2\pi/\lambda$, se tiene $y = y_0 \cos(\omega t - kx)$. (2.14)

La velocidad de la partícula u , está dada por la ecuación diferencial $\partial y / \partial t$.

Derivando la ecuación 2.13, queda:

$$u = -\omega y_0 \sin(\omega t - kx) = u_0 \cos(\omega t - kx + \pi/2) \quad (2.15)$$

u_0 es la amplitud de la velocidad de la partícula para la cual la fase de u está desplazada de y en 90° . Si se utiliza el cero de la escala para x y para t , la función de la fase se puede expresar como $\cos(\omega t - kx)$, $\sin(\omega t - kx)$ ó $\exp[j(\omega t - kx)]$.

Es conveniente expresar las variaciones de u en función de la presión acústica P que a su vez es función de $\sin(\omega t - kx)$. El uso de la función exponencial tiene la ventaja de que se simplifica el cálculo diferencial e integral. Si la función Φ representa y , u ó P , se puede formular lo siguiente:

$$\Phi = \Phi_0 \exp[j(\omega t - kx)] \quad (2.16)$$

Derivando dos veces con respecto a t y x , la ec. 2.16 queda:

$$\partial^2 \Phi / \partial x^2 = -k^2 \Phi_0 \exp[j(\omega t - kx)]$$

$$\partial^2 \Phi / \partial t^2 = -\omega^2 \Phi_0 \exp[j(\omega t - kx)]$$

Dividiendo miembro a miembro, con $c = \omega/k$ se tiene:

$$\partial^2 \Phi / \partial t^2 = c^2 \partial^2 \Phi / \partial x^2 \quad (2.17)$$

La 2.17 se denomina ecuación general de movimiento de ondas planas. La función Φ representa una onda característica ultrasónica tal que el desplazamiento de la partícula es y , la velocidad u y la presión acústica P . El exceso de presión forzado por las ondas sónicas está representado por P .

En el caso de ondas transversales, desde el punto de vista de la física es más apropiado emplear el término tensión acústica.

La ecuación 2.17, expresada según las direcciones x , y , z , queda:

$$\partial^2 \Phi / \partial t^2 = c^2 (\partial^2 \Phi / \partial x^2 + \partial^2 \Phi / \partial y^2 + \partial^2 \Phi / \partial z^2) \quad (2.18)$$

$$\partial^2 \Phi / \partial t^2 = c^2 \nabla^2 \Phi \quad (2.19)$$

El estudio de la velocidad de las ondas planas se basa en considerar una propagación en la dirección x (Fig. 2.8). Las superficies A y B del material a estudiar, tiene ángulos rectos con respecto a la dirección de propagación y una distancia x , $x + \delta x$. A un tiempo t , el movimiento de la onda produce un pequeño desplazamiento de B a B', que matemáticamente cumple con el teorema de Taylor y es igual a $y + (\partial y / \partial x) \cdot \delta x$, con una aproximación de primer orden.

Tomando una unidad de área de la sección transversal, la deformación que se produce es $\partial y / \partial x$. En consecuencia la presión acústica P cumple con la ley de Hooke, de acuerdo a lo siguiente:

$$P = -q(\partial y / \partial x) \quad (2.20), \text{ con } q: \text{Módulo de elasticidad}$$

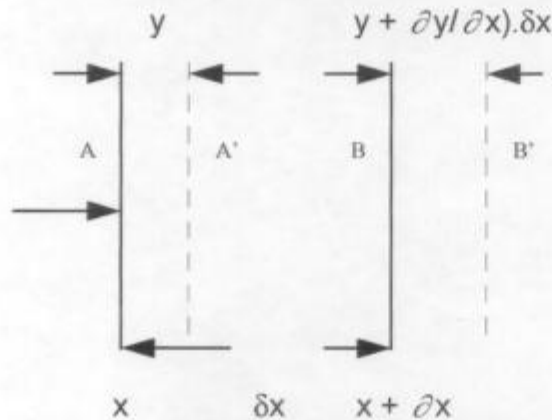


Fig. 2.8 - Deformación de una pared AB de espesor δx , por acción de una onda sónica plana sobre material homogéneo. A'B' es el desplazamiento de AB.

Si se considera otra pared CD, similar a AB, en un medio tal que el valor de la presión acústica en C y D sea P y $P + (\partial P / \partial x) \delta x$, respectivamente, por la tercera ley de movimiento de Newton en las superficies C y D actúa una presión igual y opuesta, produciéndose una compresión debido a las presiones $+P$ en C y

$-[P + (\partial P / \partial x) \delta x]$ en D, de manera que la presión acústica actuante sobre CD es:

$$- (\partial P / \partial x) \delta x$$

Por la segunda ley de movimiento de Newton, esta presión acústica actuante se puede expresar de la siguiente manera:

$$(\partial P / \partial x) \cdot \delta x = - \rho \cdot \delta x \cdot \partial^2 y / \partial t^2 \quad (\rho: \text{Densidad del material})$$

$$\text{Operando en la ecuación anterior, queda: } \partial P / \partial x = - \rho \cdot \partial^2 y / \partial t^2 \quad (2.21)$$

A partir de 2.20 y 2.21, se tiene:

$$\partial^2 y / \partial t^2 = (q / \rho) \partial^2 y / \partial x^2 \quad (2.22)$$

De las ecuaciones 2.19 y 2.22, se obtiene:

$c^2 = q/\rho$ (2.23). De esta manera, queda establecida la relación entre la velocidad de las ondas ultrasónicas (c), con las propiedades del material en que se propagan (q : módulo de elasticidad y ρ : densidad)

2.2.4 - Impedancia acústica (15)

Si se tiene una presión acústica P , el desplazamiento de la partícula y y la velocidad de dicha partícula u , se define la impedancia acústica específica como

$$Z_a = P/u \text{ (2.24)}$$

Del estudio realizado, considerando la analogía con la impedancia eléctrica, se tiene:

$$Z_a = P/u = qk/\omega = \rho c = R_a \text{ (2.25), con:}$$

$$c = \lambda f ; k = 2\pi/\lambda ; \omega = 2\pi f$$

Dado que no existe una componente reactiva, Z_a es real e igual a R_a , es decir ρc , que es el caso de ondas planas que atraviesan un material no absorbente. En el caso de materiales absorbentes, el tratamiento matemático es bastante más complejo que la ec. 2.16.

De la ecuación 2.25 se obtienen las unidades de R_a , que son $\text{kg. m}^{-2}\text{s}^{-1}$, que se denomina rayl.

2.2.5 – Intensidad acústica (15)

La intensidad acústica es el flujo de energía acústica por unidad de área en un campo de sonido. Si se toma una pequeña superficie plana δA , perpendicular a la dirección de propagación, de manera que la velocidad del flujo de la energía es δW , la relación $\delta W/\delta A$ se define como el promedio de la intensidad acústica dentro del área. Cuando δA tiende a cero, la superficie se reduce a un punto y $\delta W/\delta A$ se puede tomar como un cociente de diferenciales dW/dA , de manera que la intensidad acústica en dicho punto está dada por:

$$I = dW/dA \text{ (2.26)}$$

Para ondas esféricas se tiene $I = dW/4\pi r^2$ (2.27), con r como la distancia desde la fuente a la que se determina I . Es decir que la intensidad varía proporcionalmente con $1/r^2$.

En el caso de ondas planas en un material no absorbente, por el principio de conservación de la energía, la Intensidad es la misma en todos los puntos del campo del sonido, independientemente de la distancia. Luego la densidad de energía E representa la cantidad de energía contenida en una unidad de volumen del campo sónico. Esta energía viaja a través de cada unidad de la sección transversal, con una velocidad igual a c , de manera que la energía contenida por la columna es igual a cE , que por definición representa la intensidad I , de acuerdo a lo siguiente:

$$I = cE \text{ (2.28)}$$

Para una masa M , vibrando en un medio, la vibración puede ser estudiada de igual forma que el comportamiento del modelo elástico descrito en 2.2.2. La energía de la vibración puede describirse según la siguiente ecuación:

$$E_m = 1/2Mu^2 + 1/2y^2/C_m \quad (2.29)$$

Seleccionando los valores del tiempo t , para $y = 0$, se tiene $u = u_0$ con lo cual $E_m = 1/2Mu_0^2$. Para una unidad de volumen de material, la masa M es igual a la densidad del material, con lo que E_m es numéricamente igual a la densidad de la energía E .

De estas relaciones se tiene:

$$E = 1/2\rho u_0^2; I = cE = 1/2\rho c u_0^2 = 1/2R_a u_0^2 = 1/2P_0^2/\rho c \quad (2.30).$$

2.2.6 - Escala de decibeles (15)

Según la ecuación 2.30, la intensidad varía con el cuadrado de u_0 (amplitud). En la práctica las variaciones de la intensidad de la amplitud se expresan en decibeles (dB), de la siguiente manera:

$$\text{Incremento en nivel } \Delta dB = 10 \log_{10} (I/I_0) = 20 \log (A/A_0) \text{ dB} \quad (2.31)$$

A representa P , u ó y . El subíndice de A y de I indica el nivel de referencia.

2.2.7 - Presión de la radiación (15)

Por definición la intensidad acústica es igual a la energía por unidad de tiempo, que actúa perpendicularmente a una unidad de área. Dado que la intensidad es igual al producto de la velocidad de las ondas por la presión estática, la presión de radiación P_r , se relaciona con la intensidad según la siguiente ecuación:

$$I = P_r \cdot c \quad (2.32), \text{ con } c: \text{ velocidad del sonido}$$

2.3 – Transductores (17)

El estudio de la emisión y recepción del haz ultrasónico se basa en el efecto piezoeléctrico, que es la diferencia de potencial eléctrico que se genera entre las caras de un cristal cuando es sometido a efectos dinámicos de tracción-compresión. Inversamente, si se aplica una diferencia de potencial entre las caras del cristal la transformación de la energía eléctrica produce deformaciones que dan lugar a vibraciones. Según los planos cristalográficos en que se realice el corte del cristal, se pueden obtener ondas longitudinales o transversales. En la Fig. 2.9 se observan las características cristalográficas del cuarzo. En la Fig. 2.10 se describe la estructura interna del titanato de bario. Ambos materiales se utilizan para la construcción de transductores piezoeléctricos.

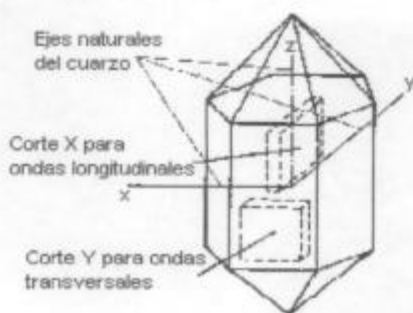


Fig. 2.9 - Cristal Piezoeléctrico de Cuarzo

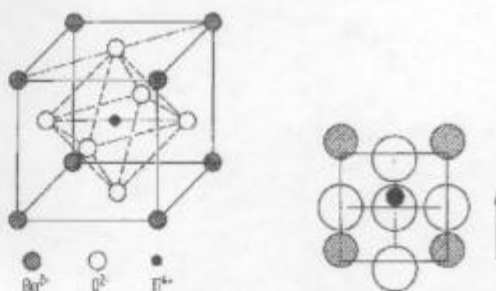


Fig. 2.10 – Estructura Cristalina de Titanato de Bario

El cristal de cuarzo natural es el más utilizado para la generación de oscilaciones ultrasónicas de alta frecuencia. Existen otros materiales como los cerámicos ferroeléctricos, circonato-titanato de plomo, metaniobato de plomo o titanato de bario que se emplean para la fabricación de cristales piezoeléctricos. Recientemente se han desarrollado otros materiales compuestos que presentan la característica de generar pulsos de gran amplitud y períodos mas cortos que los producidos por cristales de cuarzo (Fig. 2.11) (18).

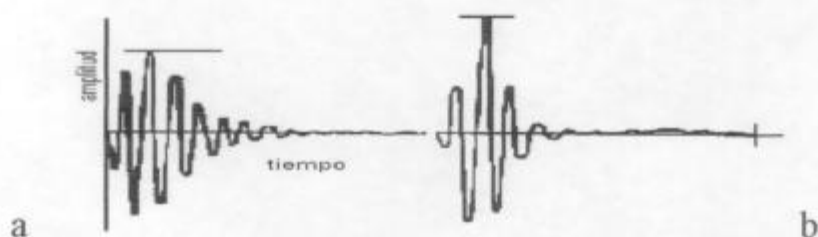


Figura 2.11 - Señal de RF a) transductor monolítico
b) transductor de material compuesto

Los transductores que se denominan palpadores, básicamente están constituidos por un conector, una carcasa, amortiguador para la absorción de las vibraciones y el cristal piezoeléctrico (Fig. 2.12)

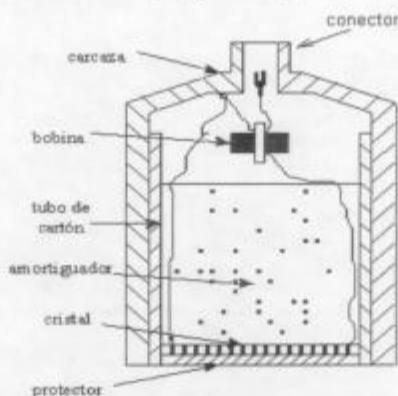


Fig. 2.12 - Esquema de un palpador normal

El haz emitido por el cristal, se abre por el fenómeno de difracción según el principio de Huygens, por el que todos los puntos de un frente de onda se consideran como centros emisores de ondas esféricas secundarias. Este fenómeno, cuyo tratamiento físico-matemático es complejo, excede al objetivo del presente

trabajo. Su comprensión es necesaria dado que se han desarrollado recientes aplicaciones en base a la difracción.

Por el fenómeno de difracción superpuesto con el del efecto de borde, se produce interferencia en el cristal emisor de manera que en las cercanías a la superficie de contacto, la distribución transversal de presiones presenta máximos y mínimos relativos que varían de sección en sección en la dirección de propagación del haz, hasta 2.5 veces la presión nominal.

En el punto correspondiente al último máximo del campo cercano, comienza el campo lejano con una zona libre de interferencias (Fig. 2.13).

En el campo lejano, el haz ultrasónico diverge con lo que la presión acústica disminuye con la distancia. El haz queda contenido en la geometría de un cono limitado por las rectas que parten del centro del cristal y que pasan por los primeros mínimos de la presión acústica. Al semiángulo formado por dichas rectas y el eje x correspondiente al máximo de la distribución transversal de la presión acústica en el campo lejano, se denomina ángulo de divergencia γ (19) y según Fraunhofer para la difracción de emisores circulares resulta:

$$\text{sen } \gamma = 1.22 \lambda / D \quad (2.33) \quad (\lambda: \text{longitud de onda acústica})$$

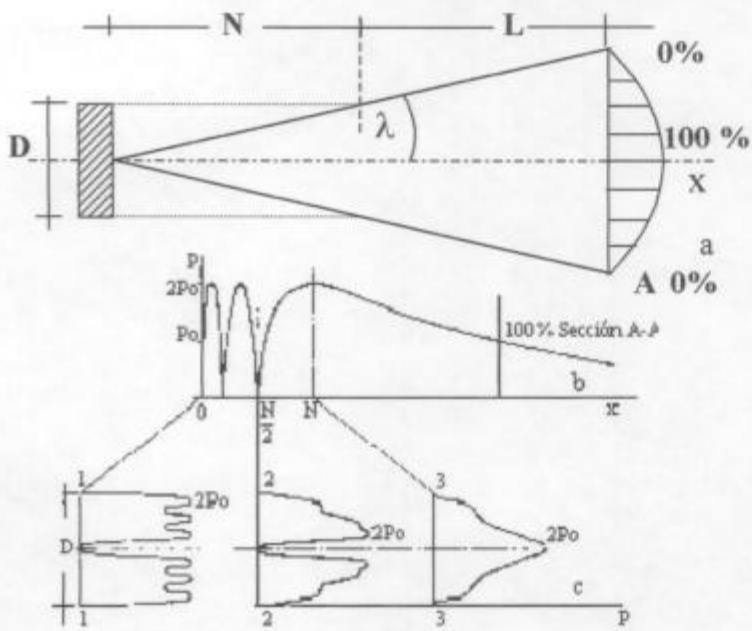


Fig. 2.13 a) campo cercano y lejano del haz ultrasónico. b y c) Distribución longitudinal y transversal de la presión acústica en el campo cercano

Para la longitud del campo cercano del haz ultrasónico, con un diámetro de palpador D, se tiene:

$$N = D^2 / 4\lambda \quad (2.34)$$

Para la comprensión de la aplicación del ensayo de ultrasonido, es importante el análisis del campo ultrasónico considerando un cristal oscilador circular, mediante una representación gráfica de las isobaras (Fig. 2.14) y de la distribución de la presión acústica en 3D, en función de la distancia (Fig. 2.15)

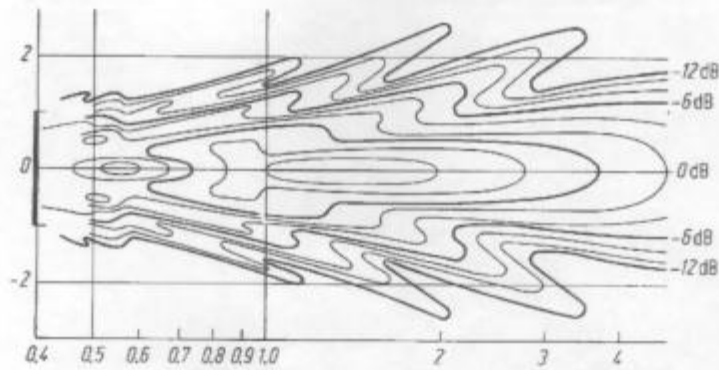


Fig. 2.14 - Isobaras de la presión acústica (20)

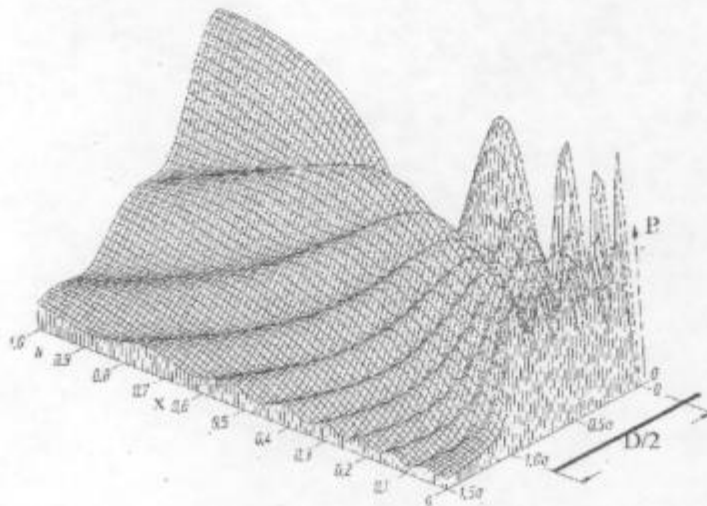


Fig. 2.15 - Distribución 3D de la presión acústica (20)

El oscilador de cristal de cuarzo tiene la ventaja de poder ser utilizado hasta los 550 °C, dado que el punto de Curie es de 570 °C.

El poder resolutivo del palpador es la capacidad de recibir señales entre dos reflectores muy próximos entre sí, diferenciándolos claramente en la pantalla del equipo de ultrasonido. Para lograr mayor resolución se han desarrollado palpadores altamente amortiguados.

Los palpadores de banda ancha altamente amortiguados, operan en un amplio rango de frecuencias y presentan un gran poder de resolución, por lo que son utilizados en aceros con alta absorción acústica y efectos de dispersión (21).

Las características de estos transductores (22), son:

- Óptima resolución
- Longitud del pulso de 1 a 2 ciclos de duración
- Banda de frecuencia 1.2 a 6.3 MHz

La sensibilidad depende de la capacidad del palpador, de convertir energía acústica en energía eléctrica y viceversa.

Los palpadores de banda angosta permiten una gran penetración con alta sensibilidad del haz ultrasónico en el acero y por lo tanto sirven para la detección de fallas alejadas de la superficie.

Para transmisión del haz ultrasónico desde el generador de señales eléctricas a la pieza de ensayo, se utilizan palpadores de contacto o de inmersión.

Según la dirección del haz de ultrasonido con respecto a la superficie de ensayo, existen palpadores de incidencia normal o de incidencia oblicua y palpadores de doble cristal.

La fabricación de los palpadores, en la actualidad es llevada a cabo exclusivamente por las industrias de tecnología de avanzada, dado que el estudio de las características físicas de los palpadores es extenso. Por lo tanto, el desarrollo de conocimiento en el laboratorio de ultrasonido del Centro Atómico Constituyentes está dirigido a la caracterización de los palpadores, para lo cual dispone de instrumental específico.

2.4 - Interacción del Haz Ultrasónico con el Acero

2.4.1 – Forma de propagación del haz ultrasónico

Las ondas longitudinales y transversales de ultrasonido transmitidas al acero, interactúan con los átomos que constituyen la estructura cristalina, produciendo un desplazamiento de dichos átomos en el campo elástico. Debido a reacción de las fuerzas atómicas de las partículas adyacentes, se produce la propagación de una onda elastomecánica de tracción-compresión. En Fig. 2.16 y Fig. 2.17, se observa el modelo de propagación del sonido en el material, en el modo longitudinal y transversal respectivamente.

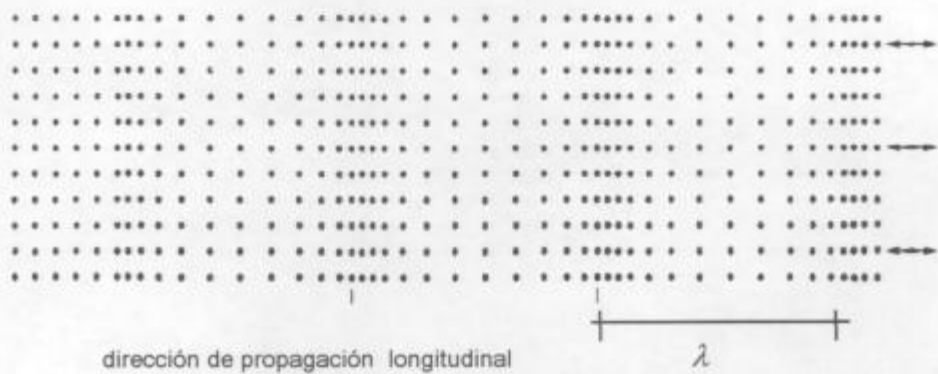


Fig. 2.16 – Propagación longitudinal del sonido en el acero

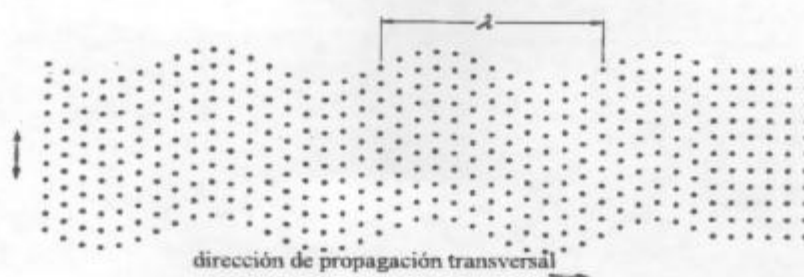


Fig. 2.17 - Propagación transversal del sonido en el acero

2.4.2 – Atenuación de ondas acústicas planas

Una consecuencia importante de la interacción del haz ultrasónico con el material es la atenuación de la presión acústica

La atenuación de las ondas acústicas planas se debe a las siguientes causas:

- Desviación de la energía del haz ultrasónico paralelo por reflexión, difracción y dispersión.

- Reflexión, refracción y difracción se produce como resultado de la interacción de las ondas sónicas con las discontinuidades. Las pérdidas por dispersión y absorción están relacionadas con las características del material sometido al ensayo de ultrasonido. Su cuantificación brinda información acerca de la estructura y las propiedades físicas del material en cuestión.

- Interacción con la estructura interna del material. En el campo lejano, la onda diverge continuamente. Por tratarse de una onda esférica de propagación cónica, la presión decrece inversamente al cuadrado de la distancia.

- Discontinuidades del acero (inclusiones, óxidos, porosidades, fisuras, etc.), se comportan como superficies límites con diferentes impedancias acústicas y producen la disminución de la presión. La alta dispersión y pérdida de energía del haz, se debe a la presencia de heterogeneidades de tamaño mayor que la longitud de onda.

- Energía consumida para la deformación de la red cristalina, que se transforma en calor. Este problema puede ser solucionado en parte, aumentando el voltaje de emisión y la amplificación, o empleando la técnica de pulso-eco operando con la menor frecuencia posible dentro del rango de 1 a 5 MHz (23)

Para la determinación del coeficiente atenuación a , se considera una placa de espesor dx a una distancia x desde la fuente de emisión (15). Para el caso de atenuación uniforme, se tiene $2a$ de fracción de pérdida de la energía por unidad de paso longitudinal constante. Para un paso dx se tiene $dE/E = -2adx$ (2.35)

Considerando la ec. 2.30, la intensidad I es proporcional a la densidad de energía E . Luego se tiene:

$$dI/I = -2adx \quad (2.36)$$

Con $x = 0$; tomando $I = I_0$ e integrando con respecto a x , se tiene:

$$I = I_0 \exp(-2ax) \quad (2.37)$$

Como I es proporcional a la amplitud al cuadrado (A^2), la 2.37 queda:

$$A = A_0 \exp(-2ax) \quad (2.38), \quad A = A_0 \text{ cuando } x = 0$$

Expresando la ecuación 2.16 en términos de la presión acústica y de la atenuación, resulta:

$$P = P_0 \exp(-ax) \exp(j(\omega t - kx)) \quad (2.39)$$

La constante a , es el coeficiente de atenuación del material que se expresa en unidades neper (m^{-1}). En la práctica se utiliza la escala de decibeles, de manera que 1 neper es equivalente a $20 \log_{10} e = 8.686 \text{ dB}$

2.4.3 – Reflexión y transmisión de ondas acústicas planas (15)

El estudio de la reflexión y transmisión de las ondas planas, en presencia del material de ensayo es complejo desde el punto de vista de la física y de la matemática. Es importante destacar que una propiedad significativa para la aplicación del ultrasonido es el coeficiente de transmisión (a_t) y de reflexión (a_r), del material. Si se tienen dos límites por los que debe atravesar el haz sónico, el fenómeno presenta las características de la Fig. 2.18.

Asumiendo que $I_i = I_r + I_t$, se tiene $a_r + a_t = 1$

En base a la ecuación 2.30, se tiene:

$$a_r = I_r/I_i = (R_2 - R_1)^2 / (R_1 + R_2)^2 \quad (2.40)$$

$$\text{Luego resulta } a_t = 1 - a_r = 4R_1R_2 / (R_1 + R_2)^2 \quad (2.41)$$

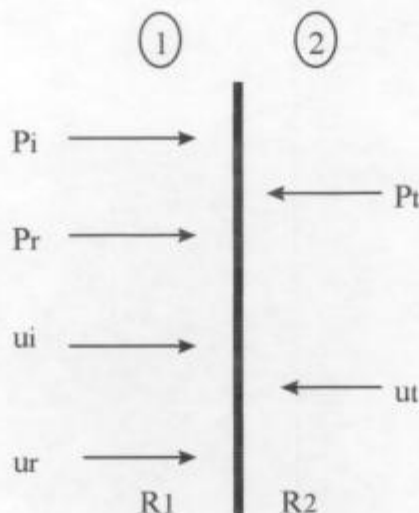


Fig. 2.18 - Reflexión y Transmisión Acústica de un haz sónico en dos materiales de diferente impedancia acústica

El coeficiente de transmisión se puede expresar como una fracción, como un porcentaje o en dB ($-10 \log_{10} a_t$), y se puede referir a la pérdida de la transmisión.

Un coeficiente de 10 % es aproximadamente igual a 10 dB y un valor de 80 % corresponde a una pérdida de 1 %. Se debe tener en cuenta el grado de acoplamiento. En general es alto para altos valores de a_t y es bajo cuando hay grandes pérdidas.

Las ecuaciones 2.40 y 2.41 indican que cuando $R_1 = R_2$, a_t alcanza el valor máximo 1 y $a_r = 0$. Esto se cumple cuando el acoplamiento es perfecto. En la práctica este tipo de situaciones se da en muy pocas oportunidades. Lo importante es que los valores de R_1 y R_2 sean del mismo orden de magnitud. Esto se cumple cuando a_t es mayor de un 70 % y la pérdida de la transmisión es menor de 1.5 dB.

Considerando que se utilizan acoplantes líquidos, cuando se ponen en contacto con el sólido, a_t es aprox. 10 %, con una pérdida de 6-7 dB, que es un valor aceptable para instrumentos con rango dinámico de 100 dB. En la Tabla 2.1, se indican valores de impedancia aplicables a ondas de compresión, para algunos materiales de gran uso. De esta manera se puede calcular a_t y la pérdida de la transmisión.

Las condiciones de reflexión y transmisión cambian considerablemente cuando se coloca entre dos materiales una sustancia de caras paralelas de espesor s e impedancia característica R_o . En este caso se tiene:

$$a_t = 4R_1R_2/[(R_1 + R_2)^2 \cdot \cos^2 ks + (R_o + R_1R_2/R_o)^2 \cdot \sen^2 ks] \tag{2.42}$$

En la ecuación 2.42, $k = 2\pi/\lambda$.

Es importante estudiar el caso en el que el material tiene un número entero de medias longitudes de onda. Para $\cos ks = 1$ y $\sen ks = 0$, se tiene la frecuencia de resonancia. La ecuación 2.42 se transforma, haciéndose idéntica a la 2.41. Dado que los transductores operan en una banda de frecuencia, esta situación no es de gran ayuda. En el caso de fuentes de banda angosta, se produce un importante incremento en la transmisión a una determinada frecuencia de resonancia.

Tabla 2.1 - Impedancia característica para ondas ultrasónicas de compresión

Material	Velocidad del sonido $c \text{ (m.s}^{-1}\text{)}$	Densidad $\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	Impedancia característica $R_a = \rho \cdot c \text{ (rayl)}$
Acero	5900	7850	4.7×10^7
Aluminio	6400	2750	1.7×10^7
Cobre	4850	8920	4.3×10^7
Oro	3200	19300	6.4×10^7
Agua	1500	1000	1.5×10^6
Aire	330	1.3	430

Operando con la ec. 2.25 y analizando la Fig. 2.18, si P_i es la presión acústica del haz incidente y P_r la presión reflejada, el coeficiente de reflexión está dado por:

$$a_r = P_r/P_i = (R_2 - R_1)/(R_2 + R_1) \quad (2.43)$$

El coeficiente de transmisión se expresa con la siguiente ecuación:

$$a_t = P_t/P_i = 2R_2/(R_2 + R_1) \quad (2.44)$$

La geometría de la reflexión y la refracción de las ondas sónicas, considerando dos medios de diferente velocidad de propagación y en consecuencia con distintas impedancias, se observa en la Fig. 2.19

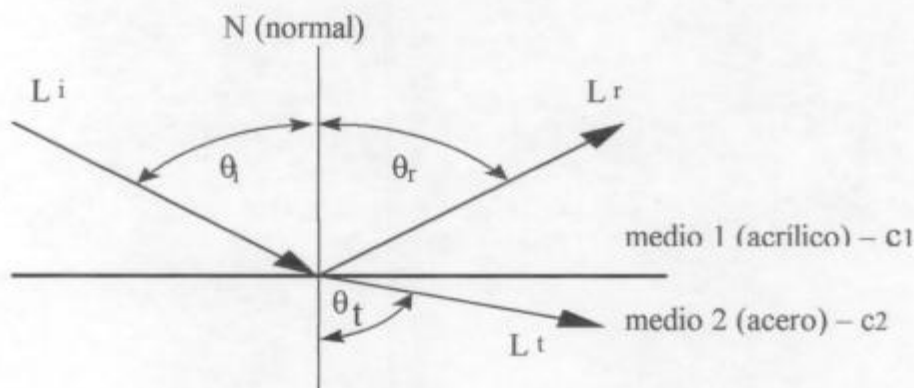


Fig. 2.19 - Reflexión y refracción de una onda longitudinal oblicua L

Los ángulos se miden en forma perpendicular a la superficie a ensayar. El fenómeno físicamente se comporta de manera similar a la luz en la óptica. Por la ley de Snell, se tiene:

$$\sin \theta_i / \sin \theta_t = c_1/c_2 = c_i/c_t = \lambda_1/\lambda_2 = \text{Constante} \quad (2.45) \quad (24)$$

En la reflexión y refracción de ondas acústicas, se debe tener en cuenta que se generan dos ondas transmitidas y dos ondas reflejadas, ambas con sus componentes longitudinales y transversales (Fig. 2.20).

La aparición de dos ondas reflejadas y dos ondas transmitidas se debe a que la presión acústica de la onda longitudinal oblicua se descompone sobre el punto de incidencia en una presión normal (compresión) y otra tangencial (de corte), que actuando sobre la superficie límite producen independientemente reflexiones y refracciones.

Los ángulos de reflexión y refracción de la onda transversal resultan menores que los de la longitudinal, debido a que en un mismo medio la velocidad de propagación de las ondas transversales es menor que la de las ondas longitudinales.

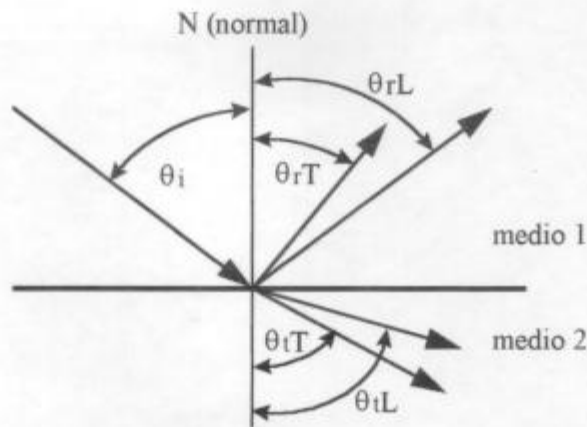


Fig. 2.20 - Reflexión y transmisión longitudinal y transversal de una onda longitudinal oblicua L
medio 1, acrílico; medio 2, acero

En los ensayos se obtiene una simplificación eliminando la onda longitudinal transmitida, haciendo que su ángulo sea de 90° . El valor del ángulo de incidencia para el cual se cumple esta situación se denomina primer ángulo crítico.

$$\text{Para } \sin \theta_{tL} = 1 \text{ se tiene } \sin \theta_{iL} = c_1L/c_2L \leq 1 \quad (2.46)$$

De la misma forma, pasando el primer ángulo crítico se puede lograr que las ondas refractadas transversales alcancen el límite de 90° . el valor del ángulo de incidencia que cumple con esta condición se denomina segundo ángulo crítico. En consecuencia se tiene:

$$\sin \theta_{tT} = 1 \text{ se tiene } \sin \theta_{iL} = c_1L/c_2T \leq 1 \quad (2.47)$$

En caso de alcanzar el segundo ángulo crítico, las ondas refractadas transversales se propagan como ondas superficiales. Pasando el valor anterior solo se obtienen reflexiones longitudinales y transversales y en consecuencia el haz no se transmite en el segundo medio.

La expresión de la velocidad de propagación de ondas longitudinales y transversales del ultrasonido en función del módulo de elasticidad se obtiene a partir de la ecuación 2.23

$$c_L^2 = E/\rho \quad (\text{Para una varilla con } Long \gg \text{diám.}) \quad (\text{con } q = E)$$

$$c_L = \{ (E/\rho)(1-\nu)[(1+\nu)(1-2\nu)]^{-1} \}^{1/2} \quad (\text{Caso general})$$

$$c_T = \{ (E/\rho)[2(1+\nu)]^{-1} \}^{1/2} = (G/\rho)^{1/2}$$

E: Módulo de elasticidad longitudinal

G: Módulo de elasticidad transversal

ν : Coeficiente de Poisson

Para el acero se tiene $c_T = 0.534 c_L$

2.5 – Técnica e Instrumentos para Ensayo de Ultrasonido

2.5.1 – Selección de la técnica de ultrasonido

La detección de discontinuidades internas en uniones soldadas se realizó por medio de la técnica de pulso-eco. En el espectro tecnológico, esta técnica de END se utiliza en la mayoría de las situaciones de control de calidad de componentes soldados. Es el único método de contacto especificado por los códigos AWS (9), ASME (10) y las normas ASTM (14) (25) la consideran como única técnica aplicable en el campo tecnológico.

A continuación se describe el principio físico de dicha técnica, las características y el funcionamiento del instrumental utilizado.

2.5.2 - Técnica de pulso-eco

La técnica de pulso-eco se desarrolla según los principios de la física descriptos en los puntos 2.2 y 2.4 del presente capítulo y teniendo en cuenta lo señalado en el punto 2.3. En la superficie de la pieza se coloca un palpador (transductor piezoeléctrico emisor-receptor). El instrumento electrónico (equipo de ultrasonido), al cual se conecta el palpador, fundamentalmente permite determinar el tiempo que tarda en llegar el eco de un tren de ondas ultrasónicas emitido. (Fig. 2.21). Para la detección de discontinuidades en el acero el equipo genera pulsos de ondas ultrasónicas (26)

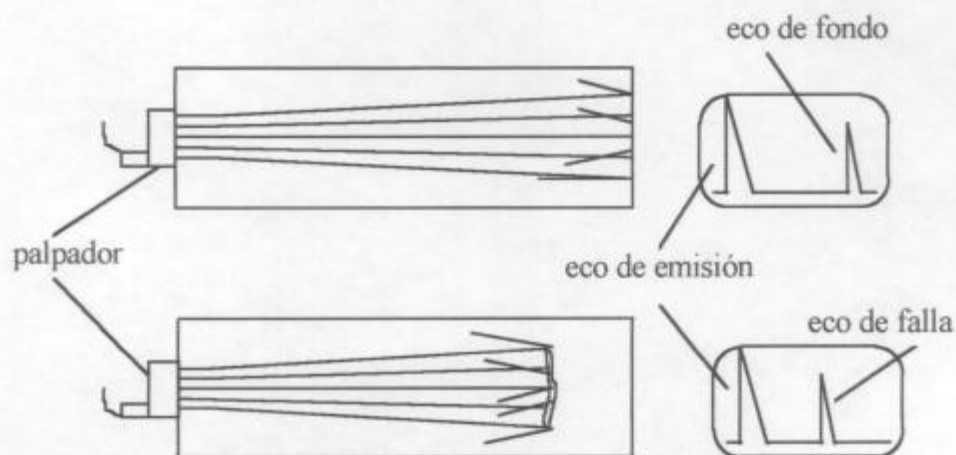


Fig. 2.21 - Principio del método pulso-eco

El método de pulso-eco permite lograr la siguiente información:

- Posición del palpador, cuando el eco se produce
- La direccionalidad del haz emitido por el transductor
- El tiempo de tránsito del pulso-eco
- Forma del eco.

La interacción de la onda de ultrasonido con el reflector (discontinuidad), depende de los siguientes aspectos importantes.

- El transductor influye sobre el pulso transmitido y recibido, dadas sus características direccionales.

- El reflector puede modificar la forma y dirección de la propagación de la onda reflejada y producir transformaciones de dicha onda.

- El material también modifica la forma y amplitud de pulso-eco por absorción del sonido, anisotropía y dispersión.

La interacción entre la onda ultrasónica y el reflector en general no se produce de manera ideal. En la mayoría de los casos una parte del haz impacta sobre el reflector y solo una porción reflejada es recibida por el instrumento. También puede producirse un cambio de modo (por ej. una onda longitudinal incidente cambia a una onda transversal refractada) (Fig. 2.22), con lo que la onda recibida puede ser diferente a la onda transmitida. En estos casos una posible solución es lograr que la onda incidente sea tal que permita obtener una única onda refractada, de manera de evitar el análisis simultáneo de los efectos de dos ondas con distintas velocidades y dirección de propagación sobre los reflectores. Esta situación favorable se cumple cuando el ángulo de incidencia corresponde a valores comprendidos entre el 1er. Y 2do. ángulo crítico (ec. 2.46 y 2.47) (27).

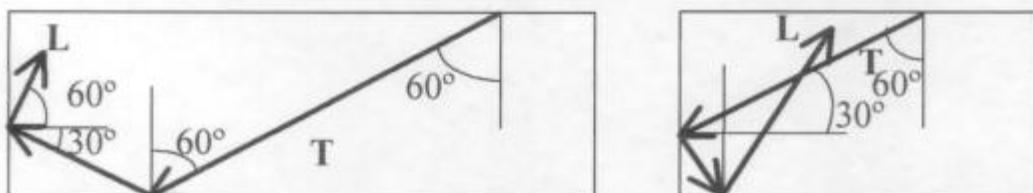


Fig. 2.22 - Ángulo crítico con conversión de ondas transversales (T de 30°) a longitudinales (L 60°)

Si previamente se conoce el tipo y posición del reflector, con el método de evaluación descrito se obtienen buenos resultados, similares a los que se logran con un método analítico más completo (28)

El método de pulso-eco de evaluación simple, presenta las siguientes variantes:

- Evaluación del tiempo de tránsito: Conociendo la posición y forma del reflector, se determina el tiempo de tránsito.

- Barrido del borde del reflector: Si se agrega la información de la posición del reflector al tiempo de tránsito, mediante el barrido se determina la dimensión del reflector. El tamaño del reflector debe ser mayor que el diámetro del haz ultrasónico. Con el tiempo de tránsito, se calcula la posición del reflector. Para conocer las dimensiones del reflector, se puede utilizar su proyección sobre la superficie de la pieza de ensayo (barrido tipo C), pero es conveniente utilizar la amplitud del eco para determinar la reflexión del borde del reflector. Se maximiza la señal del reflector y cuando se ubica el centro del haz ultrasónico en el borde del reflector, la amplitud de la señal presenta una caída de 6 dB (método 50 %). (Fig. 2.23).

- Evaluación de la máxima amplitud del eco. Se realiza combinando la máxima amplitud del eco con la información del tiempo de tránsito. Se calcula la posición del reflector y se determina la máxima amplitud del eco correspondiente a un reflector artificial de referencia que permite conocer el tamaño real del defecto. Se emplea el método de AVG (Abstand-Verstärkung-Groesse) (29), con el que es posible evaluar el tamaño G de una discontinuidad detectada a una distancia A, teniendo en cuenta la amplificación V que hace falta para elevar su eco a una determinada línea de referencia o el método DAC (26), que se basa en el trazado de curvas distancia-amplitud-compensación, con reflectores artificiales construidos en bloques del material a ensayar, con el mismo espesor y calidad superficial.

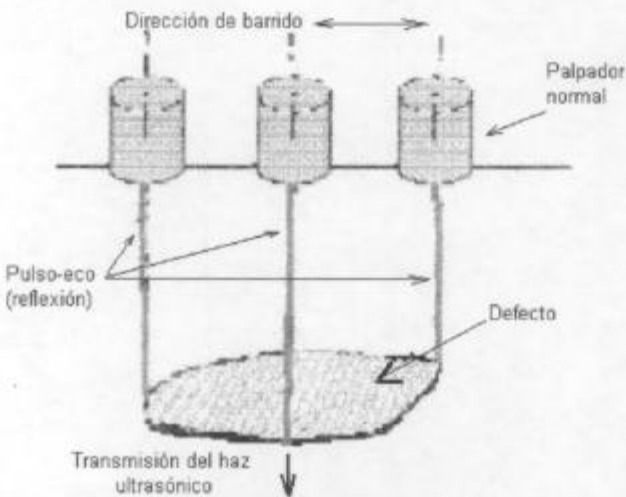


Fig. 2.23 – Determinación del tamaño del reflector (discontinuidad) Por barrido del borde con palpador normal

- Análisis del espectro de frecuencias de la señal RF. Empleando la señal eléctrica del pulso-eco, se puede conocer las dimensiones del reflector, considerado como plano. Una señal eléctrica característica en modo RF se observa en la Fig. 2.24. Los parámetros a tener en cuenta para el estudio de estas señales son el grado de rectificación, smoothing, filtrado, etc., que afectan a los resultados.

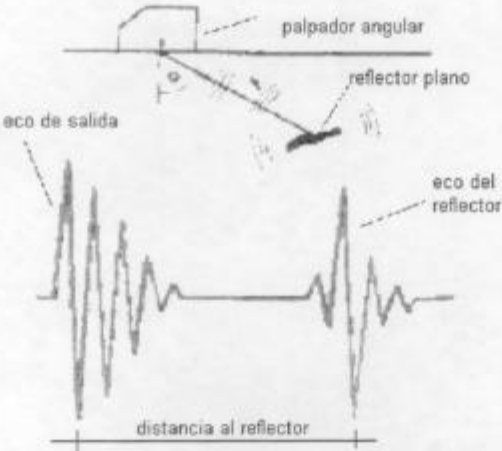


Fig. 2.24 - Eco de reflector plano en modo RF detectado con palpador angular

La detección de discontinuidades por la técnica de pulso-eco, cuyo esquema se observa en la Fig. 2.21, se resume de acuerdo a lo siguiente:

- Detección del reflector
- Evaluación de las características del reflector, analizando el tiempo de tránsito o la máxima amplitud del eco.
- Clasificación primaria del tipo de reflector, con cierto grado de dificultad. En este caso se realiza el análisis de la señal, relacionando la combinación de las diferentes características de varios ecos resultantes del barrido, a fin de determinar el tipo de defecto.
- Una mejor caracterización del reflector, teniendo en cuenta el tipo, posición y tamaño, se logra por medio de una señal ultrasónica en modo RF. Esto presenta complicaciones debido a las limitaciones de carácter físico del observador. Las señales analizadas a simple vista no presentan una diferencia apreciable para distintos tipos de discontinuidades.
- Para distintos tipos de discontinuidades de los procesos de soldadura de arco eléctrico, la señal de RF del reflector es característica. Su procesamiento por digitalización y aplicación de transformadas tiempo-frecuencia permite lograr una mejor clasificación. (30)

2.5.3 – Circuito generador de barrido y de pulsos (31)

El esquema del funcionamiento del instrumento utilizado para la técnica de pulso-eco, se observa en la Fig. 2.25

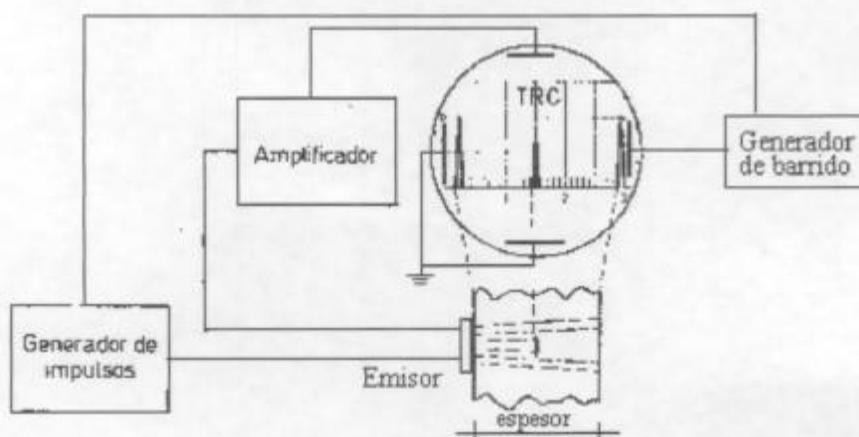


Fig. 2.25 - Esquema de detección de fallas
Técnica pulso-eco

El generador envía impulsos eléctricos al palpador. El palpador por efecto piezoeléctrico transforma los impulsos eléctricos en impulsos de ultrasonido, que son transmitidos a la pieza de ensayo. El mismo impulso eléctrico dispara el barrido horizontal sobre la pantalla de rayos catódicos. Simultáneamente con la emisión de impulsos ultrasónicos, el haz electrónico se desplaza de izquierda a derecha sobre

la línea de cero, a una velocidad regulable. El impulso eléctrico de emisión llega al amplificador y actúa sobre la placa vertical del tubo de rayos catódicos, de manera que la señal luminosa es desviada al comienzo de su movimiento y en dirección vertical, para descender hasta la línea de cero y continuar luego hacia la derecha. Cuando un impulso ultrasónico es reflejado por la pared opuesta de la pieza, vuelve al palpador que por efecto piezoeléctrico genera un impulso eléctrico que llega al amplificador y a la placa vertical del tubo de rayos catódicos, que desvía la señal en dirección vertical. el fenómeno descrito se repite miles de veces por segundo. Por este motivo se observa una imagen estática. El impulso emisor aparece como un pico en el borde izquierdo de la pantalla y el eco como otro pico a cierta distancia hacia la derecha del eco de emisión. Esta distancia depende del tiempo que tarda el impulso ultrasónico en recorrer la pieza ida y vuelta y de la velocidad de desplazamiento del haz electrónico de derecha a izquierda en la pantalla. Esta última operación es comandada por el circuito de barrido del instrumento que es independiente del circuito de generación de pulsos eléctricos, por lo que la velocidad de desplazamiento se puede regular en forma continua. Con otro dispositivo (tercer dial), pueden desplazarse todas las imágenes conjuntamente, sin modificar sus posiciones relativas. Esto se conoce como delay.

Utilizando correctamente las zonas de prueba, el desplazamiento del punto cero y la velocidad del sonido del material a ensayar, se determina la distancia entre el palpador y el lugar de reflexión. Para esto, la pantalla tiene una escala graduada o un marcador electrónico de tiempo. En la Fig. 2.26, se observan un oscilogramas, con defectos característicos de piezas de acero.

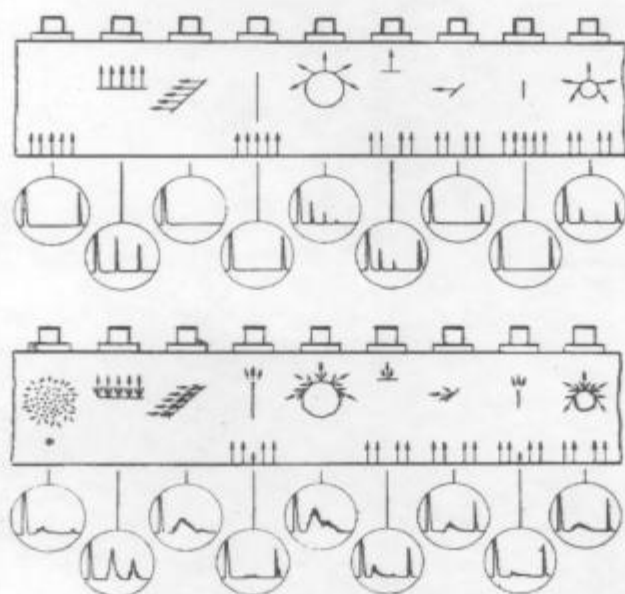


Fig. 2.26 - Oscilogramas de defectos característicos de acero
Modo onda rectificada completa

El funcionamiento del generador de pulsos eléctricos y barrido, es independiente de las características del palpador utilizado. Para la ejecución del ensayo de detección de discontinuidades, se debe realizar el ajuste previo del instrumento, teniendo en cuenta la diferente velocidad de propagación de los distintos tipos de ondas (longitudinales o transversales), según lo establecido en los

procedimientos específicos, especialmente cuando se utilizan palpadores angulares.

La regulación de la amplitud de la señal eléctrica producida por el eco puede realizarse con un atenuador calibrado que aumenta o disminuye la altura de las señales en la pantalla, lo cual da una ganancia que se expresa en decibeles de acuerdo a lo siguiente:

$$\text{Amplificación o Atenuación: } a \text{ (dB)} = 20 \log_{10} (H_1/H_2) \quad (2.48)$$

H_1 y H_2 representan la amplitud de la señal antes y después de la atenuación o amplificación.

La comparación entre dos ecos, explica el concepto de atenuación o amplificación. Para una la relación entre dos picos es $H_1/H_2 = 2/1$, se tiene $a(\text{dB}) = 20\log 2 = 6 \text{ dB}$. esto implica una reducción igual a la mitad con una atenuación de 6 dB.

La linealidad vertical del instrumento se obtiene cuando los ecos están afectados por un factor de amplificación o atenuación constante. La amplitud de los ecos es independiente del tiempo de recorrido de las ondas, pero está relacionada con la pérdida de la energía. En consecuencia para una determinación correcta se debe tener en cuenta la magnitud de las pérdidas, lo que se logra variando la amplificación para todos los ecos hasta compensar las diferencias con el mando de ganancia variable.

2.5.4 – Equipos de ultrasonido

Las características del equipo digital utilizado son las siguientes (32):

a - Marca Krautkramer USD15 S - Modelo 97 (Fig. 2.27)



Fig. 2.27 - Equipo digital Krautkramer USD15 S

b - Funciones principales

- GAIN. Incremento de la intensidad acústica en dB, con 0.5 dB de paso, de 0 a 110 dB

- DISPLAY DELAY. Ajuste de retardo de barrido. Permite desplazar los ecos sin variar su posición relativa.

- PROBE DELAY. Ajuste de retardo debido al acrílico del palpador, que varía desde 0 μ s.

- VEL. Ajuste de la velocidad del sonido del material. Permite predeterminar dos velocidades (por ej. 5920 m/s para ondas longitudinales y 3255 m/s para ondas transversales para el acero). Es posible ajustar la velocidad del sonido para otros materiales, sin cambiar las opciones predeterminadas.

- RANGE. Ajuste de la distancia de exploración de 0 a 3000 mm

- DAMPING se ajusta la amortiguación del transductor, a fin de graduar la sensibilidad y el poder de resolución del ensayo.

- RECTIF. Controla los modos del eco

- Full-wave. Despliega en la pantalla las media-ondas positivas y negativas

- Positive half wave. Despliegan solo las partes positivas de las ondas

- Neg. h. w.. Despliega la parte negativa de las ondas

- RF-LR. Modo radio-frecuencia para bajos rangos

- RF-HR. Modo radio-frecuencia par rangos altos

- ANGLE. Cambia los ángulos en grados según el tipo de palpador utilizado

- FREQU. Selecciona la frecuencia del palpador de 0 a 15 Mhz.

b - Características del instrumento

- Display digital para barrido A, con indicación del valor en distancia para cada gate. Dispone de tres gates. Se puede seleccionar la función de profundidad, que permite conocer las coordenadas de cada reflector.

- Operación en modo por reflexión y modo por transparencia

- Linealidad vertical: ± 0.5 %

- Resolución vertical 0.5 %

- Máximo tensión del transmisor: 480 V

El equipo analógico utilizado presenta las siguientes características (33):

a - Marca Gilardoni RG - 21, con módulo para procesamiento digital EMS/RG - Modelo 89

b - Características operativas

- Regulación de las características del eco en modo Onda Rectificada y modo Radiofrecuencia.

- Damping para regulación de la amortiguación del transmisor.

- Delay para regulación de la posición del eco.

- Amplificación de 0 a 100 dB, con paso de 2 dB

- Regulación de la frecuencia de 0.5 a 15 MHz

c - Características del instrumento

- Monitor del osciloscopio graduado

- Operación en modo por reflexión y modo por transparencia

- Máximo tensión del transmisor: 600 V

2.5.5 – Características de los transductores utilizados en el ensayo de ultrasonido

Los transductores utilizados para la ejecución de los ensayos fueron los siguientes (34):

- Palpador angular de contacto directo para ondas transversales, marca Krautkramer MWB 45 – N4 (Oscilador de 8x9 mm; Angulo de 45°; Frecuencia de 4 MHz – Monolítico)

El uso de este palpador se basa fundamentalmente en lo siguiente:

La onda transversal de 45°, se encuentra comprendida entre el primero (27°) y el segundo ángulo crítico (57°), considerando como medio 1 acrílico (zona de onda incidente longitudinal) y medio 2 acero (zona de onda transmitida transversal). De esta manera es posible operar sin la presencia de ondas longitudinales transmitidas (se evita el cambio de modo de propagación de las ondas transmitidas)

Con palpadores de 45°, es posible el empleo de las curvas DAC trazadas con una cantidad mínima de puntos (cinco).

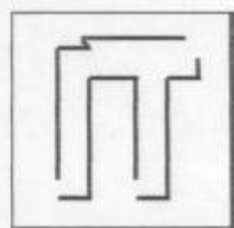
La atenuación del material de las probetas (incluyendo las que se sometieron a tratamiento térmico de normalizado), permite el empleo de una frecuencia de ensayo de 4 MHz.

Habitualmente en primer instancia la exploración para la detección de reflectores en uniones soldadas se realiza con este tipo de palpadores.

- Palpador normal de contacto directo para ondas longitudinales, marca Krautkramer MB 4F (Oscilador de ϕ 10 mm; Frecuencia 4 MHz)

3

DESARROLLO EXPERIMENTAL



3 - DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1 - Construcción de Probetas con Defectología Inducida por Soldadura

3.1.1 - Procedimiento empleado para la construcción de las probetas

- Selección del material.
- Selección de la forma de cada probeta.
- Caracterización de propiedades físicas y químicas del material
- Selección de la defectología a inducir y/o implantar en cada probeta.
- Selección del proceso de soldadura para la fabricación de las probetas.
- Mecanizado y soldadura.

3.1.2 - Selección del Material

El acero calidad SAE 1010, se utilizó para la puesta a punto de las técnicas de soldadura e inducción de defectos. El estado de la calidad superficial no aceptaba el acoplamiento del palpador para su caracterización por ultrasonido, por lo que fue necesario su reacondicionamiento por mecanizado y amolado.

Las placas de acero SAE 1045, se utilizaron teniendo en cuenta la tendencia a la formación de estructuras frágiles y presencia de fisuras.

El acero SAE 4140 en estado forjado se seleccionó por su contenido de aleantes (Cr, Mo), para simular el caso de aceros de alta resistencia mecánica para recipientes a presión. Los sectores de los grandes reactores (por ej. recipientes a presión), se fabrican por forja. Para el forjado de las bases se utilizan prensas hidráulicas de 4000 a 20000 tn, con punzones esféricos especiales. Se obtienen espesores de hasta 500 mm. Para el presente trabajo se utilizaron un bloque forjado de 70x500x600 mm, con superficie de terminado en caliente, no apta para control por ultrasonido. Luego del corte de las probetas, se mecanizó la superficie.

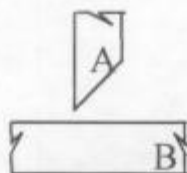
El acero calidad C-75, responde a normas API 5CT. Es de la línea de producción de Siderca SAIC. Estos tubos laminados en caliente, permitieron estudiar situaciones complejas de uniones soldadas, semejantes a los casos de componentes destinados a procesos de alta presión y alta temperatura.

Las placas de acero SAE 1536, se utilizaron para soporte de las probetas tipo toberas (unión por soldadura con tubo de acero sin costura). Por dilución, empleando electrodos calidad AWS E 6013 y alambre calidad AWS ER 70 S6, se logró controlar la formación de martensita en cantidades críticas y evitar la fisuración de los cordones de soldadura.

3.1.3 - Diseño de las juntas

El diseño de las juntas se realizó según especificaciones ANSI/AWS D.1.1-86 (35). El detalle es el siguiente:

- a – Juntas tipo T, con bisel V de 45°
Acero Laminado Calidad SAE 1010



- b – Juntas con bisel V de 60° - Acero Laminado Calidad SAE 1010



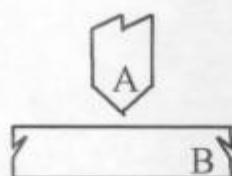
- c – Juntas con bisel V de 60° - Acero Laminado Calidad SAE 1045



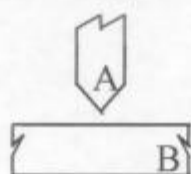
- d – Juntas tipo Z con bisel V de 60°- Acero Laminado Calidad SAE 1045



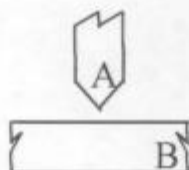
e – Juntas tipo T con bisel K de 45° - Acero Laminado Calidad SAE 1045



f – Juntas tipo T con bisel K de 45° - Acero Laminado Calidad SAE 1045



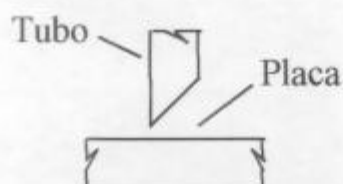
g – Juntas tipo T, con bisel K de 45°
Acero Forjado Calidad SAE 4140



h – Junta con bisel V de 70° - Tubos de Acero Laminado Calidad C-75



i – Junta tipo T con bisel V de 45° - Tubos de Acero Laminado Calidad C-75
Placas de Acero laminado Calidad SAE 1536



3.1.4 - Caracterización de propiedades físicas y químicas del material

Las determinaciones de análisis químico se realizaron por espectrometría de fluorescencia de Rayos X, dispersiva en energías. El análisis químico de cada material se presenta en Anexo II.

Las mediciones de tamaño de grano, dureza y nivel de inclusiones se efectuaron en laboratorios de la Unidad Actividad Materiales del Centro Atómico Constituyentes de la CNEA.

La caracterización de los materiales se realizó de acuerdo a lo siguiente:

a - Calidad SAE 1010

- Composición química(%): C 0.13 - Mn 0.6 - Si 0.3 - P 0.023 - S 0.032

- Tamaño de grano: nº 5 - 6 (dúplex). según ASTM E 112 (Diámetro medio de cada grano 0.072 - 0.051 mm). 80 % nº 6.

- Dureza: 166 - 176 HB (Brinell)

- Nivel de inclusiones: Serie fina y gruesa A 3 - B 3 - C 3 - D 2 (A: Sulfuros - B: Aluminatos - C: Silicatos - D: Oxidos). Según ASTM E 45

- Calidad superficial: De laminación en caliente, con incrustaciones de cascarilla. No apta para ensayo de ultrasonido.

- Carbono equivalente CE (%) = 0.23 % (Ec. 1.10)

- Observaciones: El nivel de impurezas (P, S, Si), se encuentra en tenores normales, de manera de posibilitar la obtención de cordones soldados sin la presencia de compuestos de bajo punto de fusión. En principio no es necesario tratamiento térmico de normalizado para afinar el tamaño de grano, considerando que se debe controlar la atenuación del ultrasonido por el material. Los granos son muy alargados en la dirección de laminación. El valor del CE indica alta soldabilidad

b - Calidad SAE 1045

- Composición química (%): C 0.47 - Mn 0.66 - Si 0.25 - P 0.019 - S 0.027 - Cr 0.078 - V 0.01 - Al 0.023

- Tamaño de grano: nº 5, según ASTM E 112 (Diámetro medio de cada grano 0.072 mm)

- Dureza: 225 - 234 HB (Brinell)

- Nivel de inclusiones: Serie fina y gruesa A 3 - B 3 - C 3 - D 3 (A: Sulfuros - B: Aluminatos - C: Silicatos - D: Oxidos). Según ASTM E 45

- Calidad superficial: De laminación en caliente. No apta para ensayo de ultrasonido.

- CE = 0.57 %

- Observaciones: El nivel de impurezas (P, S, Si), se encuentra en tenores normales, de manera de posibilitar la obtención de cordones soldados sin la presencia de compuestos de bajo punto de fusión. Acero calmado al aluminio. El tamaño de grano puede causar dificultades para la ejecución del ensayo de ultrasonido. El nivel del CE indica que este acero no es soldable en condiciones normales (límite de soldabilidad 0.55 %).

c - Calidad SAE 4140

- Composición química(%): C 0.42 - Mn 0.82 - Si 0.32 - P 0.035 - S 0.035 - Cr 0.92 - Mo 0.19 - Al 0.032

- Tamaño de grano: nº 4, según ASTM E 112 (Diámetro medio de cada grano 0.10 mm)

- Dureza: 276 - 286 HB (Brinell)

- Nivel de inclusiones: Serie fina y gruesa A 2 - B 2 - C 1.5 - D 1.5 (A: Sulfuros - B: Aluminatos - C: Silicatos - D: Oxidos). Según ASTM E 45

- Calidad superficial: De forja en caliente. No apta para ensayo de ultrasonido.

- CE = 0.78 %

- Observaciones: El nivel de impurezas (P, S, Si), se encuentra en tenores normales, de manera de posibilitar la obtención de cordones soldados sin la presencia de compuestos de bajo punto de fusión. Acero calmado al aluminio. El tamaño de grano grueso, es característico de grandes secciones de forja. Este tamaño de grano en general produce alto nivel de ruido y atenuación en presencia de ondas ultrasónicas. Para solucionar el problema habitualmente se aplica tratamiento térmico de normalizado. La dureza superficial es elevada lo que dificulta el corte y mecanizado. El CE indica que se trata de un acero no soldable en condiciones normales.

d - Calidad C-75 (Norma API 5CT)

- Composición química (%): C 0.37 - Mn 1.45 - Si 0.37 - P 0.026 - S 0.035

- Tamaño de grano: nº 6-7, según ASTM E 112 (Diámetro medio de cada grano 0.051-0.04 mm)

- Dureza: 236 - 245 HB (Brinell)

- Nivel de inclusiones: Serie fina y gruesa A 3 - B 1 - C 3 - D 2 (A: Sulfuros - B: Aluminatos - C: Silicatos - D: Oxidos). Según ASTM E 45

- Calidad superficial: De laminación en caliente. No apta para ensayo de ultrasonido.

- CE = 0.61 % (acero templable por soldadura con arco eléctrico)

Observaciones: El nivel de impurezas (P y S), se encuentra en tenores normales, de manera de posibilitar la obtención de cordones soldados aptos. La cantidad de silicio presente y las inclusiones de tipo silicatos indican que el estado de oxidación es calmado con alambre de Ca-Si. No se detectó Al. El tamaño de grano es fino y apto para el ensayo de ultrasonido. El CE indica que el acero no es soldable en condiciones normales. La dureza es elevada, produciendo gran desgaste en el herramental de corte y mecanizado. Esta característica es típica de los aceros de alto manganeso.

e - Calidad SAE 1536

- Composición química (%): C 0.31 - Mn 1.37 - Si 0.29 - P 0.022 - S 0.025

- Tamaño de grano: nº 6, según ASTM E 112 (Diámetro medio de cada grano 0.051 mm)

- Dureza: 217 - 227 HB (Brinell)

- Nivel de inclusiones: Serie fina y gruesa A 3 - B 3 - C 4 - D 3 (A: Sulfuros - B: Aluminatos - C: Silicatos - D: Oxidos). Según ASTM E 45

- Calidad superficial: De laminación en caliente. No apta para ensayo de ultrasonido.

- CE = 0.54 %

- El nivel de impurezas (P, S, Si), se encuentra en tenores normales, de manera de posibilitar la obtención de cordones soldados aptos. No se detectó Al.

El estado de oxidación (calmado), se logró mediante Ca-Si. El tamaño de grano apto para el ensayo de ultrasonido. El CE indica que el acero es soldable. Las placas presentan alta dureza que ocasionan gran desgaste del herramental de corte y mecanizado.

f - Observaciones

Según la norma ASTM E 45, el nivel de inclusiones se clasifica en niveles 1, 2, 3 y 4. El nivel 1 corresponde a aceros limpios, con pocas inclusiones evaluadas por metalografía. El nivel 3 es muy elevado para los procesos de aceración modernos.

Los aceros con tamaño de grano ASTM E 112 nº 6 o más fino, son los que presentan menor atenuación para el ensayo de ultrasonido.

La dureza Brinell se obtuvo con una tolerancia de ± 2 HB

Las temperaturas de normalizado presentaron una tolerancia de ± 10 °C

La amplitud (dB), se midió con una tolerancia de 2%

Las distancias (mm), se midieron con una tolerancia de 0.5 %

3.1.5 - Control de la calidad superficial y acondicionamiento de las superficies para ensayo de ultrasonido.

a - Placas de acero laminado SAE 1010, espesor 20 mm. Este material es un remanente de un proyecto de la CNEA. Dado el tiempo de permanencia a la intemperie presenta alto grado de corrosión superficial.

Se tomaron muestras para control de la atenuación del haz ultrasónico. Para posibilitar el acoplamiento del palpador con las muestras se procedió a la eliminación del óxido de hierro por amolado, hasta lograr una rugosidad R_a de alrededor de $6\text{ }\mu\text{m}$ ($230\text{ }\mu\text{in}$), con lo que se logró una respuesta aceptable a las ondas ultrasónicas utilizadas para los ensayos (50 % de altura mínima del eco de fondo con respecto al eco de emisión).

b - Placas de acero laminado en caliente SAE 1045, espesor 25 mm y 30 mm. Este material presenta buena terminación superficial. Los sectores con incrustación de cascarilla de laminación se eliminaron por amolado, logrando una rugosidad aceptable de 5 a $7\text{ }\mu\text{m}$

c - Placas de acero forjado SAE 4140 de 20 y 25 mm de espesor. Para lograr una superficie apta para control por ultrasonido se realizó mecanizado

d - Tubos de acero laminado en caliente C-75. Se procedió a amolar la superficie para lograr una superficie apta para ensayo de ultrasonido.

e - Placas de acero laminado en caliente SAE 1536. Por amolado se logró una superficie apta para control por la técnica de ultrasonido. Este material presentaba grandes sectores con incrustación de cascarilla de laminación.

3.1.6 - Calidad de los electrodos utilizados

a - Electrodos calidad AWS E 6013.

- Electrodos rutilicos para aceros al carbono. Presenta buen encendido, arco suave y penetración media. Se aplican en toda posición. Se obtienen cordones con excelente terminación.

- Composición química (%): C 0.07 - Mn 0.04 - Si 0.3 - P 0.025 - S 0.03

- Polaridad: Electrodo al polo negativo

- Diámetros y corriente de soldadura: 2 mm - 40/65 amperes; 2.5 mm - 70/100 A; 3 mm - 100/155 A

b - Alambre macizo calidad ER 70 S-6 (Norma AWS A 5.18 y Código ASME 2 parte C).

- Diámetro 1.6 mm, con recubrimiento de cobre para mejorar la conductividad eléctrica. También tiene un agregado de aluminio como desoxidante. Este electrodo se utiliza en particular con gas de protección CO_2 y se logra una mejora en la eficiencia de la transferencia de tipo globular y por corto circuito.

- Composición química (%): C 0.09 - Mn 0.9 - Si 0.5 - P 0.025 - S 0.03 - Cu 0.5

- Polaridad directa: Electrodo al polo positivo

- Características operativas: 20/30 V; 160/300 A

3.1.7 - Determinación del grado de atenuación de las ondas ultrasónicas

Considerando que el objetivo del ensayo de ultrasonido es la determinación del tamaño y posición de los reflectores, el grado de atenuación que se produce cuando el ultrasonido interactúa con el material tiene importancia por las siguientes razones:

a - Indica la factibilidad de ejecución del ensayo de ultrasonido. En caso de existir un alto grado de atenuación (>0.04 dB/mm), el nivel de ruido generado impide la detección de las discontinuidades presentes cuya reflexión no es completa ya sea por las características de su superficie (irregular), por sus dimensiones, por su ubicación, por la dirección de dicha reflexión (falta de paralelismo con respecto a la superficie de apoyo del palpador), por su forma (puede ser compleja) o por sus características absorbentes.

b - Permite conocer las dimensiones de las discontinuidades detectadas mediante cálculo, descontando la ganancia en dB correspondiente a la atenuación.

En los casos de alto grado de atenuación, puede resultar muy difícil la determinación de la posición del reflector, dado que la señal generada por la atenuación (conocida como pasto o hierba), puede cubrir la señal correspondiente a dicho reflector.

La atenuación a , para el caso de ondas longitudinales se determina según la ec. 2.48.

$$a = 20\log_{10}(H1/H2)/x \text{ (dB/mm)} \text{ (2.48)}$$

H1: Altura del eco en dB, medido en la pantalla del osciloscopio o leído en el equipo digital, empleando gate A. No se utiliza el eco de salida.

H2: Altura de un segundo o cuarto eco con respecto al eco de H1.

x: Distancia del camino sónico entre H1 y H2, que recorre la onda ultrasónica ida y vuelta hasta el palpador.

Para resolver el problema de la atenuación se adoptó la siguiente metodología:

- Determinación del grado de atenuación a .

- Si el material presenta un grado de atenuación aceptable (altura del eco de fondo 50 % mín. de la altura del eco de emisión), se procede al mecanizado de la junta para soldadura.

- En caso de existir un alto grado de atenuación se extraen muestras para control metalográfico de macroestructura y microestructura. Si es factible la modificación y refinamiento de la estructura por tratamientos térmicos, se destina el material a normalizado. Si la estructura es de solidificación primaria se descarta el material. Esta decisión se adoptó teniendo en cuenta la incidencia de la estructura de solidificación de la soldadura que también presenta un cierto grado de atenuación característico. En la Fig. 3.1 se observa el espectro de frecuencias en modo RF, correspondiente a una zona del cordón de soldadura, sin discontinuidades internas. La máxima amplitud de la señal acústica en este caso, alcanzó el 20 % de la altura de pantalla del osciloscopio.

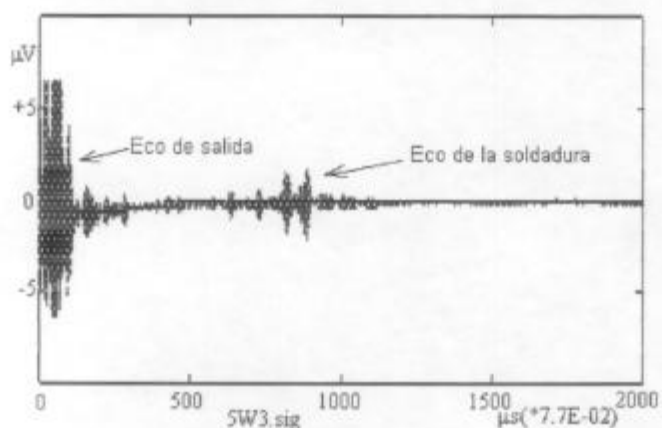


Fig. 3.1 - Espectro de frecuencias en RF. Cordón de soldadura Acero SAE 1045 - Electrodo AWS E 6013

- Atenuación de referencia del patrón de calibración V1

Para la calibración en distancia, con palpador de 4 Mhz, se opera con 7 ecos para 350 mm a fondo de escala, según se observa en la Fig. 3.2

Empleando una ecuación simplificada de la 2.48, para $x = 200$ mm (para la distancia recorrida por el ultrasonido entre el 1er. eco, 22 dB y el 5to. eco, 30 dB) para 80 % de altura de pantalla y considerando la resta de 6 dB por divergencia del haz ultrasónico en el campo lejano, se tiene:

$$a = \frac{\Delta dB_{1-5} - 6dB}{x} = \frac{(8 - 6)dB}{200mm} = 0.01dB/mm \quad (3.1)$$

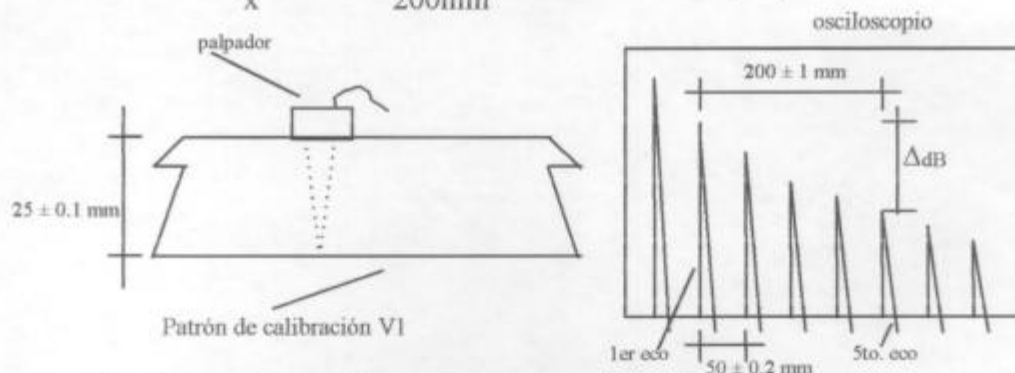


Fig. 3.2 - Atenuación de referencia de calibre V1
Altura de pantalla 80 %, 1er. eco, 22 dB; 5to. eco, 30 dB
Tolerancia en amplitud: 2 %

- Atenuación del material destinado a la construcción de probetas

Si bien también se puede determinar la atenuación para ondas transversales, para conocer las características del material a utilizar en las experiencias y tomar una decisión relativa a su aptitud, dada la simpleza del método, es conveniente proceder de acuerdo a 3.2.3.

- Acero SAE 1010 - Placas laminadas de 20 ± 1 mm de espesor

Altura de pantalla 80 %, 1er. eco, 27.5 dB; 5to. eco, 37 dB

$x = 160$ mm

$a = 0.022$ dB/mm (valor promedio).

Esta atenuación se considera aceptable para el empleo del material.

- Acero Calidad SAE 1045 - Placas laminadas de 25 ± 1 mm de espesor

Altura de pantalla 80 %, 1er. eco, 29 dB; 5to. eco, 40 dB

$x = 200$ mm

$a = 0.025$ dB/mm (valor promedio).

Esta atenuación se considera aceptable para el empleo del material.

- Acero Calidad SAE 1045 - Placas laminadas de 30 ± 1 mm de espesor

Altura de pantalla 80 %, 1er. eco, 27 dB; 5to. eco, 44 dB

$x = 240$ mm

$a = 0.046$ dB/mm (valor promedio).

Dado el elevado valor de la atenuación, el material se destinó a tratamiento térmico de normalizado para lograr un tamaño de grano mas fino y homogéneo. Se aclara que esta placa pertenece a la misma colada que las placas de 25 mm de espesor.

- Acero Calidad SAE 4140 - Placa de 20 ± 1 mm de espesor, obtenida por corte de un bloque forjado.

Altura de pantalla 80 %, 1er. eco, 29 dB; 5to. eco 46 dB

$x = 160$ mm

$a = 0.069$ dB/mm (valor promedio).

Dado el elevado valor de la atenuación, el material se destinó a tratamiento térmico de normalizado para lograr un tamaño de grano mas fino y homogéneo. Esta placa pertenece a la misma colada que las placas de 25 mm de espesor.

El valor de la atenuación es congruente con el tamaño de grano observado en microscopio metalográfico.

- Acero Calidad SAE 4140 - Placas de 25 ± 1 mm de espesor, obtenidas por corte de un bloque forjado.

Altura de pantalla 80 %, 1er. eco, 27 dB; 5to. eco 51 dB

$x = 200$ mm

$a = 0.09$ dB/mm (valor promedio).

Dado el elevado valor de la atenuación, el material se sometió a tratamiento térmico de normalizado para lograr un tamaño de grano mas fino y homogéneo.

El valor de la atenuación es congruente con el tamaño de grano observado en el microscopio metalográfico.

- Acero Calidad C-75 - Tubos laminados en caliente de 273 ± 3 mm de diámetro exterior y 28 ± 1 mm de espesor.

Altura de pantalla 80 %, 1er. eco, 24.5 dB; 5to. eco 37 dB

$x = 224$ mm

$a = 0.029$ dB/mm (valor promedio).

El valor de la atenuación es aceptable para la ejecución del ensayo de ultrasonido.

- Acero Calidad SAE 1536. Placas laminadas en caliente de 20 ± 1 mm de espesor.

Altura de pantalla 80 %, 1er. eco, 27 dB; 5to. eco 37 dB

$x = 160$ mm

$a = 0.025$ dB/mm (valor promedio).

El valor de la atenuación es aceptable para la ejecución del ensayo de ultrasonido.

- Observaciones: Las normas no indican valores límites de atenuación. Este requisito habitualmente se fija entre el fabricante y el usuario.

Un valor de atenuación característico, que se tomó como referencia es el correspondiente al patrón V1, para el cual el Código ASME establece un valor de 0.01 dB/mm máx.

Mediante tratamientos térmicos o termomecánicos, en determinados casos es posible lograr valores de atenuación similares a los relevados en el patrón V1. Aún tratándose de probetas como las del presente estudio, la aplicación de estos tratamientos es compleja, costosa y lenta. De hecho, para el caso de componentes industriales fabricados por soldadura, se requieren instalaciones de gran porte para la aplicación de los citados tratamientos térmicos, lo que en general es poco factible. La solución es agregar a la especificación técnica de compra del producto forjado o laminado, el requisito de atenuación, con el consiguiente sobre costo, para poder realizar la evaluación de la defectología correctamente en las distintas etapas de elaboración y control.

3.1.8 - Tratamiento térmico de normalizado de placas de acero con alto grado de atenuación de las ondas ultrasónicas sónicas.

Las placas laminadas de acero SAE 1045 y forjadas de SAE 4140, se sometieron a tratamiento térmico de normalizado, de acuerdo a lo siguiente:

- Normalizado SAE 1045. Placa de 30 mm de espesor

Temperatura del horno 860 ± 10 °C

Determinación del tiempo de calentamiento. Utilizando la ec. 3.2 y con la superficie de la probeta se calcula el tiempo de permanencia. Luego se enfría al aire.

$$K = k/\rho C \text{ (cm}^2\text{/s)} \quad (3.2)$$

$k = 0.14$ (cal/s.cm.°C) (conductividad térmica)

$\rho = 7.85$ gr/cm³ (densidad del acero)

$C = 0.155$ cal/gr.°C

$K = 0.115$ cm²/s (difusividad térmica)

Dimensiones la placa tratada: 300 x 200 x 30 mm

Superficie expuesta: 850 cm²

Tiempo de calentamiento: 2 horas

Tamaño de grano luego del normalizado: nº 6 ASTM E 112 (homogéneo)

Atenuación: 0.030 dB/mm. Valor aceptable para ensayo de ultrasonido

- Normalizado SAE 4140. Placas de 25 y 20 mm de espesor

Temperatura del horno 870 ± 10 °C

Determinación del tiempo de calentamiento. Utilizando la ecuación 3.2, con la superficie de la probeta se calcula el tiempo de permanencia a temperatura de tratamiento térmico y luego se enfría al aire.

Máxima dimensión de la placa tratada: 400 x 200 x 25 mm

Superficie expuesta: 850 cm²

Tiempo de calentamiento: 2.7 horas

Tamaño de grano luego del normalizado: nº 6 ASTM E 112

Atenuación: 0.027 dB/mm. Valor aceptable para ensayo de ultrasonido

La variación de la microestructura para la placa de 25 mm de espesor se observa en la Fig. 3.3

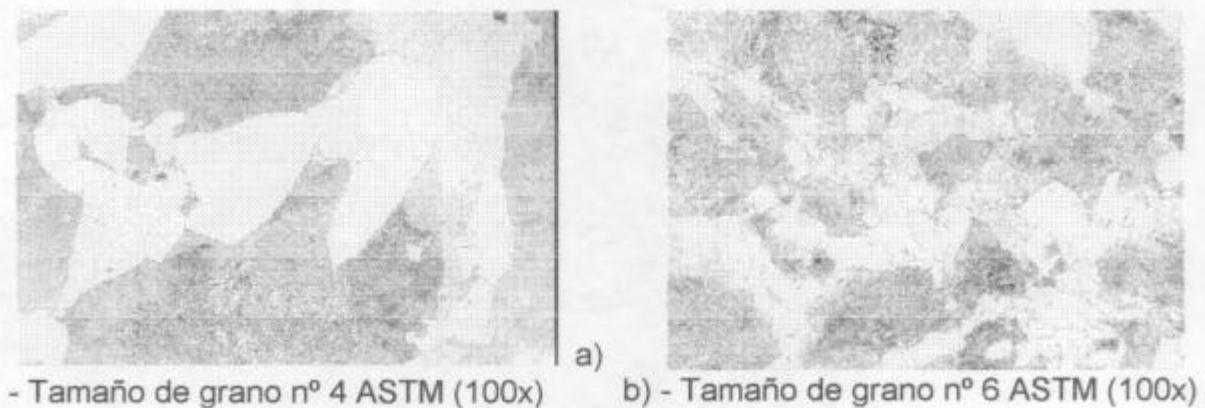


Fig. 3.3 - Variación del tamaño de grano por tratamiento térmico de normalizado. Acero SAE 4140. a) Estado forjado. b) Normalizado.

La placa de 20 mm de espesor, luego del normalizado presentó una atenuación de 0.025 dB/mm.

Observaciones: Luego del tratamiento térmico de normalizado, se reacondicionó la superficie de las placas por mecanizado y/o amolado. Luego se procedió a la fabricación de las probetas, según lo establecido en 3.1.1.

3.1.9 - Soldadura de probetas (36)

Para el cálculo de los parámetros del proceso de soldadura se utilizaron las ecuaciones 1.1 a 1.13.

a - Probetas 101 - 102 - 103

Implante de Falta de fusión: Por proceso SMAW. Diámetro del electrodo: 2.5 mm. Calidad AWS E 6013. Voltaje = 40 V. Intensidad = 70 A. Velocidad de avance del electrodo 11 mm/s (esta velocidad es alta, pero evita el quemado de los implantes). Energía aportada 229 J/mm (baja). Dilución 20 % (contribución del implante en zona mezclada).

Soldadura de la junta: Proceso automático GMAW. Electrodo: Alambre de acero 1.6 mm de diámetro. Calidad AWS ER 70 S-6. V 26 Volts. Intensidad 180 A. Velocidad de avance del electrodo 8 mm/s. Energía aportada 526 J/mm. Masa aportada 0.58 gr/s. Para el cierre de la unión, se utilizó un plan de 9 pasadas. Perfil de las temperaturas máximas en la ZAT: a 0.5 mm de distancia de límite de fusión, 1065 °C; a 1 mm, 790 °C ; a 2 mm, 525 ° C y a 3 mm, 396 °C.

Probeta nº 101. En la tercer pasada, contra la pared de la junta, se cambió la energía aportada a 364 J/mm, para inducir falta de fusión.

Probeta nº 102. En la cuarta y quinta pasada., se varió la alimentación de CO₂ de 0.2 lt/min a 0.5 lt/min, para inducir porosidad fina.

Probeta nº 103. La pasada de raíz se realizó con proceso SMAW, con electrodo AWS 6013 de diámetro 2.5 mm. Energía aportada 405 J/mm (elevada para este tipo de proceso). El resto de las pasadas se completó con proceso GMAW.

b - Probetas nº 104 -105 -106

Implante de Falta de fusión: Por proceso SMAW. Diámetro del electrodo 2.5 mm. Calidad AWS E 6013. Voltaje = 40 V. Intensidad = 70 A. Velocidad de avance del electrodo 12 mm/s. Energía aportada 210 J/mm (baja). Dilución 15 % (contribución del implante). La alta velocidad de avance de la torcha posibilita implantes mas íntegros.

Soldadura de la junta: Proceso automático GMAW. Electrodo: Alambre de acero 1.6 mm de diámetro, calidad AWS ER 70 S-6. V 26 Volts. Intensidad 180 A. Velocidad de avance del electrodo 8 mm/s, en pasada de raíz. Energía aportada 526 J/mm. Para el cierre de la unión se empleó un plan de 9 pasadas. Masa aportada 0.63 gr/s. Velocidad de enfriamiento promedio en la zona de transformación 88 °C/s. Perfil de las temperaturas máximas en la ZAT: a 0.5 mm de distancia de límite de fusión, 1065 °C; a 1 mm, 790 °C ; a 2 mm, 525 ° C y a 3 mm, 396 °C.

- Probeta 104. Se indujo defecto de socavado en zona de bisel, en el cierre de la unión.

- Probeta 105. Se produjo falta de penetración en un sector de raíz, lo que indica lo dificultoso de la aplicación de la soldadura en juntas.

- Probeta 106. Se produjo atrape de escoria, realizando un cordón con soldadura SMAW en la 6 pasada. Para este caso, se operó con 432 J/mm, con electrodo de 3 mm de diámetro, calidad AWS E 6013. Esta energía es elevada para proceso SMAW. El objetivo fue evitar la falta de fusión para no mezclar este defecto con el atrape de escoria.

c - Probeta nº 201

Implante de Falta de fusión por proceso SMAW. Diámetro del electrodo: 2.5 mm. Calidad AWS E 6013. Voltaje = 30 V. Intensidad = 70 A. Velocidad de avance del electrodo 12 mm/s. Energía aportada 157.5 J/mm (baja). Dilución 10 % (contribución del implante en zona mezclada), para disminuir el aporte de electrodo a fin de lograr implantes mas íntegros, que favoreciesen su detección posterior.

Soldadura de la junta: Proceso automático GMAW. Electrodo de alambre de acero 1.6 mm de diámetro. Calidad AWS ER 70 S-6. V 26 Volts. Intensidad 180 A. Velocidad de avance del electrodo 8 mm/s. Energía aportada 526 J/mm. Masa aportada 0.63 gr/s. Velocidad de enfriamiento promedio en la zona de transformación 88 °C/s. Para el cierre de la unión, se utilizó un plan de 14 pasadas. En las pasadas 6 y 7, en la parte central de la junta se varió el caudal de gas de protección de 0.8 lt/min a 0.4 lt/min, para inducir porosidad, logrando los resultados esperados. A simple vista se observaron poros de 4 mm de diámetro, separados.

Perfil de las temperaturas máximas en la ZAT: a 0.5 mm de distancia de límite de fusión, 979 °C; a 1 mm, 700 °C; a 2 mm, 451 °C y a 3 mm, 336 °C.

d - Probetas 301 - 302 - 304

El acero utilizado es de transformación martensítica, por lo que se tomaron algunos recaudos para evitar fisuración instantánea, en el enfriamiento. Para controlar el alto grado de distorsión, el cierre de cada junta se realizó en dos etapas. El aporte se aplicó por sectores, para evitar el enderezado.

Energía aportada 210 J/mm para una velocidad de avance de la torcha de 7 mm/s. En probeta de ensayo no se observó presencia de martensita en Zona Afectada Térmicamente (ZAT). Para velocidades de 9 mm/s o mayores aparecen estructuras frágiles.

Junta mecanizada tipo Z. Este tipo de junta permite disponer de una extensa zona con falta de penetración, para determinar la eficiencia de implantes de este clase de defectos.

Soldadura de la junta: Proceso automático GMAW. Electrodo de alambre de acero 1.6 mm de diámetro. Calidad AWS ER 70 S-6. V 28 Volts. Intensidad 220 A.

Velocidad de avance del electrodo 5 mm/s. Energía aportada 1108 J/mm. Masa aportada 0.67 gr/s. Espesor relativo $\tau = 1.31$. Velocidad de enfriamiento promedio en la zona de transformación $R(^{\circ}\text{C/s}) = 41^{\circ}\text{C/s}$. Se observa presencia de 20 % de martensita en ZAT. Este porcentaje de martensita no conduce a rotura por fragilidad. Se trató de disminuir la velocidad de enfriamiento empleando el calor de las pasadas previas para precalentamiento.

Perfil de las temperaturas máximas en la ZAT: a 0.5 mm de distancia de límite de fusión, 1185 $^{\circ}\text{C}$; a 1 mm, 927 $^{\circ}\text{C}$; a 2 mm, 649 $^{\circ}\text{C}$ y a 3 mm, 502 $^{\circ}\text{C}$.

Para el cierre de la unión, de cada lado de la probeta se utilizó un plan de 7 pasadas. En la probeta n° 302 en la tercera pasada se varió el caudal de gas a 0.8 lt/min a 0.3 lt/min, observándose porosidad de 4 mm de diámetro. En la probeta 304, en el centro del cordón en el cierre se observa falta de fusión.

A fin de evaluar la eficiencia del proceso en la zona unión a tope, en las tres probetas se procedió con la menor cantidad de variaciones posible.

Para una mejor terminación de la soldadura, fue necesario el reacondicionamiento de la calidad superficial por amolado.

e - Probetas n° 126 - 127 - 128

El acero utilizado es SAE 1045, de transformación martensítica. Para evitar formación y propagación de fisuras se realizaron experiencias con precalentamiento. Para el control de la distorsión, el cierre de cada unión lateral se realizó en etapas. El aporte se realizó por sectores, para evitar el enderezado, aprovechando la información técnica relativa a variación dimensional relevada en la fabricación de las probetas 101, 102 y 103.

Implante de falta de fusión, con soldadura SMAW, con electrodo de 2.5 mm de diámetro. Energía aportada 172 J/mm para una velocidad de avance de la torcha de 11 mm/s. Para menores velocidades de avance del electrodo se observa zonas de quemado en el implante. Para mayores velocidades, hay falta de adherencia.

Junta mecanizada tipo K. Este tipo de junta es el que menor dificultad presenta para el cierre de la raíz. Se logra buena penetración del electrodo debido a la posibilidad de entrega de aporte de material y energía por los dos flancos.

Soldadura de la junta. Proceso automático GMAW. Electrodo de alambre de acero 1.6 mm de diámetro. Calidad AWS ER 70 S-6. V 28 Volts. Intensidad 200 A. Velocidad de avance del electrodo 5 mm/s. Probeta n° 126: Energía aportada 1010 J/mm. Masa aportada 0.67 gr/s. Espesor relativo $\tau = 1.18$. Velocidad de enfriamiento promedio en la zona de transformación $R(^{\circ}\text{C/s}) = 45.9^{\circ}\text{C/s}$. Se observa presencia de 25 % de martensita en ZAT. Para control de estructura, las probetas n° 127 y 128 se precalentaron a 100 $^{\circ}\text{C}$, con lo cual la operó con una velocidad de enfriamiento de 34 $^{\circ}\text{C/s}$. El porcentaje de martensita detectado en la ZAT es menor del 15 %, difícil de detectar.

Perfil de las temperaturas máximas en la ZAT a 0.5 mm de distancia de límite de fusión, 1214 °C; a 1 mm, 963 °C; a 2 mm, 684 °C y a 3 mm, 533 °C.

Considerando un precalentamiento de 100 °C, el perfil de temperaturas máximas en la ZAT a 0.5 mm de distancia de límite de fusión, es de 1139 °C; a 1 mm, 895 °C ;a 2 mm, 629 °C y a 3 mm, 488 °C.

Para el cierre de la unión, de cada lado de la probeta se utilizó un plan de 7 pasadas. En la probeta nº 128 en la cuarta pasada se varió el caudal de gas de 0.8 lt/min a 0.3 lt/min, observándose porosidad de 3 mm de diámetro.

El control de la distorsión se realizó empleando un plan de pasadas por sectores, aportando a cada lado de la junta en forma alternativa.

f - Probeta nº 129

El acero utilizado es SAE 1045, de transformación martensítica. Para el control de la distorsión, el cierre de cada unión lateral se soldó por etapas.

Implante de falta de fusión, con soldadura SMAW, con electrodo de 2.5 mm de diámetro. Energía aportada 196 J/mm para una velocidad de avance de la torcha de 11 mm/s. Para mayores velocidades, no se logró adherencia del implante.

Junta mecanizada tipo K. La soldadura de las primeras pasadas resultó dificultosa para lograr buena penetración. El problema se atenuó con el aporte de ambos flancos de la junta.

Soldadura de la junta: Proceso automático GMAW. Electrodo de alambre de acero 1.6 mm de diámetro. Calidad AWS ER 70 S-6. Dilución resultante 30 % (aporte de la placa de acero que da lugar a un acero tipo SAE 1020). V 27 Volts. Intensidad 220 A. Velocidad de avance del electrodo 4 mm/s. Energía aportada 1336 J/mm. Masa aportada 0.67 gr/s. Espesor relativo $\tau = 1.23$. Velocidad de enfriamiento promedio en la zona de transformación $R(^{\circ}\text{C/s}) = 34.6$ °C/s. Se observa presencia 15 % de martensita en la ZAT.

Perfil de las temperaturas máximas en la ZAT: a 0.5 mm de distancia de límite de fusión, 1154 °C; a 1 mm, 890 °C; a 2 mm, 614 °C y a 3 mm, 472 °C.

Para el cierre de la unión, de cada lado de la probeta se utilizó un plan de 9 pasadas. En la sexta pasada se realizó implante de falta de fusión lateral, directamente variando la energía de soldadura a 720 J/mm con una velocidad de 5 mm/s, manteniendo constante el caudal de gas (0.8 lt/min).

g - Probetas nº 411 - 412 - 413 - 414 - 415 - 416

Acero utilizado SAE 4140 forjado, aleado, de transformación martensítica. Para evitar formación y propagación de fisuras se realizaron experiencias con precalentamiento y un determinado plan de pasadas (Fig. 3.4)

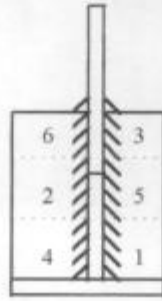


Fig. 3.4 - Plan de pasadas para control de distorsión
Acero SAE 4140 - Espesor 25 mm - Junta tipo K

Implante de falta de fusión, con soldadura SMAW, con electrodo de 2.5 mm de diámetro. Energía aportada 172 J/mm para una velocidad de avance de la torcha de 11 mm/s. En probeta de ensayo se observó falta de fusión de 80 % en el implante. Para menores velocidades de avance del electrodo se observó zonas de quemado en el implante. Para mayores velocidades, hay falta de adherencia. y fisuras en el cráter de terminación (Fig. 3.5)

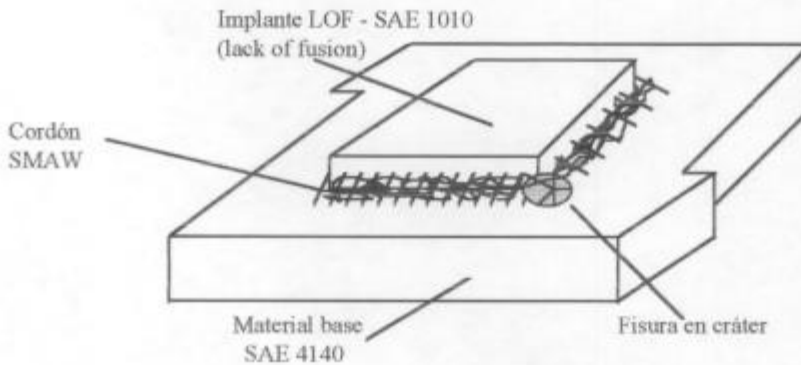


Fig. 3.5 - Formación de cráter en implante LOF
Acero forjado SAE 4140

Soldadura : Junta mecanizada tipo K. Proceso automático GMAW. Electrodo de alambre de acero 1.6 mm de diámetro. Calidad AWS ER 70 S-6.

- Probeta nº 411. Soldadura de la junta con proceso GMAW, con voltaje de 26 volts. Intensidad 220 A. Velocidad de avance del electrodo 4 mm/s. Energía aportada 1287 J/mm. Masa aportada 0.67 gr/s. Espesor relativo $\tau = 1.28$. Velocidad de enfriamiento promedio en la zona de transformación $R(^{\circ}\text{C/s}) = 26 ^{\circ}\text{C/s}$. Se observa presencia de 10 % de martensita en ZAT. Para el cierre de ambos flancos de la junta, se utilizó el precalentamiento de las pasadas previas. La temperatura medida con termocupla de contacto antes de las últimas pasadas fue de 100 °C. La velocidad de enfriamiento lograda se considera óptima, sobre la base del equipamiento y condiciones operativas disponibles. Se aplicaron 7 pasadas por junta. En la tercer pasada se realizó implante de escoria atrapada en un flanco, utilizando proceso SMAW con electrodo de 2.5 mm diámetro, calidad AWS E 6013.

Perfil de las temperaturas máximas en la ZAT: a 0.5 mm de distancia de límite de fusión, 1287 °C; a 1 mm, 1057 °C; a 2 mm, 781 °C y a 3 mm, 621 °C.

- Probeta nº 412. Soldadura de la junta con proceso GMAW. Voltaje 26 Volts. Intensidad 200 A. Velocidad de avance del electrodo 4 mm/s. Energía aportada 1170 J/mm. Masa aportada 0.67 gr/s.. Espesor relativo $\tau = 1.34$. Velocidad de enfriamiento promedio en la zona de transformación $R(^{\circ}\text{C/s}) = 28.8$ $^{\circ}\text{C/s}$. Se observa presencia de aproximadamente 10 % de martensita en ZAT (difícil de detectar). Para el cierre de ambos flancos de la junta, se utilizó el precalentamiento de 100-120 $^{\circ}\text{C}$ por calor aportado por las pasadas previas. La velocidad de enfriamiento lograda se considera aceptable para evitar fisuración por presencia de martensita e hidrógeno. Se aplicaron 7 pasadas por junta. En la cuarta pasada, en un flanco del bisel se cambió el caudal de CO_2 de 0.8 lt/min a 0.3 lt/min, para inducir porosidad.

Perfil de las temperaturas máximas en la ZAT: a 0.5 mm de distancia de límite de fusión, 1260 $^{\circ}\text{C}$; a 1 mm, 1021 $^{\circ}\text{C}$; a 2 mm, 743 $^{\circ}\text{C}$ y a 3 mm, 586 $^{\circ}\text{C}$.

- Probeta nº 413. Soldadura con proceso GMAW. Voltaje 26 volts. Intensidad 200 A. Velocidad de avance del electrodo 4 mm/s. Energía aportada 1170 J/mm. Masa aportada 0.67 gr/s. Espesor relativo $\tau = 1.34$. Velocidad de enfriamiento promedio en la zona de transformación $R(^{\circ}\text{C/s}) = 28.8$ $^{\circ}\text{C/s}$. Se observa presencia de aproximadamente 10 % de martensita en ZAT (difícil de detectar). Para el cierre de ambos flancos de la junta se utilizó el precalentamiento de 100-120 $^{\circ}\text{C}$ por calor aportado por las pasadas previas. La velocidad de enfriamiento lograda es aceptable para evitar fisuración por presencia de martensita e hidrógeno. Se aplicaron 7 pasadas por junta. En la tercer pasada se realizó implante de falta de fusión, paralelo al cordón, contra el flanco de la junta, utilizando proceso SMAW con electrodo de 3 mm diámetro, calidad AWS E 6013. Se operó con 30 V, 100 A y una velocidad de 12 m/s. Luego del enfriamiento se observó un defecto de falta de penetración de 14 mm de longitud. Luego de procedió al cierre de la unión con proceso GMAW, de acuerdo al plan de pasadas previsto.

Perfil de las temperaturas máximas en la ZAT: a 0.5 mm de distancia de límite de fusión, 1260 $^{\circ}\text{C}$; a 1 mm, 1021 $^{\circ}\text{C}$; a 2 mm, 743 $^{\circ}\text{C}$ y a 3 mm, 586 $^{\circ}\text{C}$.

- Probeta nº 414. 26 Volts. Intensidad 200 A. Velocidad de avance del electrodo 4 mm/s. Energía aportada 1170 J/mm. Masa aportada 0.67 gr/s. Espesor relativo $\tau = 1.34$. Velocidad de enfriamiento promedio en la zona de transformación $R(^{\circ}\text{C/s}) = 28.8$ $^{\circ}\text{C/s}$. Se observa presencia de aproximadamente 10 % de martensita en ZAT. Para el cierre de ambos flancos de la junta, se utilizó el precalentamiento de 100 $^{\circ}\text{C}$ por calor aportado por las pasadas previas. La velocidad de enfriamiento lograda es aceptable para evitar fisuración por presencia de martensita e hidrógeno. Se aplicaron 7 pasadas por filete, según plan definido en Fig. 3.4

Perfil de las temperaturas máximas en la ZAT: a 0.5 mm de distancia de límite de fusión, 1260 $^{\circ}\text{C}$; a 1 mm, 1021 $^{\circ}\text{C}$; a 2 mm, 743 $^{\circ}\text{C}$ y a 3 mm, 586 $^{\circ}\text{C}$.

- Probeta nº 415. 27 Volts. Intensidad 220 A. Velocidad de avance del electrodo 5 mm/s. Energía aportada 1069 J/mm. Masa aportada 0.72 gr/s.. Espesor relativo $\tau = 1.12$. Velocidad de enfriamiento promedio en la zona de transformación $R(^{\circ}\text{C/s}) = 31$ $^{\circ}\text{C/s}$. Se observa presencia de aproximadamente 15 % de martensita

en ZAT. Para el cierre de ambos flancos de la junta se utilizó el precalentamiento de 100 °C por calor aportado por las pasadas previas. La velocidad de enfriamiento lograda es aceptable para evitar fisuración por presencia de martensita e hidrógeno. Se aplicaron 6 pasadas por junta, de acuerdo con el plan previsto.

Perfil de las temperaturas máximas en la ZAT: a 0.5 mm de distancia de límite de fusión, 1322 °C; a 1 mm, 1104 °C; a 2 mm, 833 °C y a 3 mm, 670 °C.

- Probeta nº 416. 26 Votls. Intensidad 200 A. Velocidad de avance del electrodo 4 mm/s. Energía aportada 1170 J/mm. Masa aportada 0.72 gr/s.. Espesor relativo $\tau = 1.34$. Velocidad de enfriamiento promedio en la zona de transformación $R(^{\circ}\text{C/s}) = 28.8 ^{\circ}\text{C/s}$. Se observa presencia de aproximadamente 10 % de martensita en ZAT. Para el cierre de ambos flancos de la junta, se utilizó el precalentamiento de 100 °C por calor aportado por las pasadas previas. La velocidad de enfriamiento lograda es aceptable para evitar fisuración por presencia de martensita e hidrógeno. Empleando curvas de enfriamiento continuo se estimó la presencia de 20 % de martensita. En probeta de ensayo para control de estructura se detectó un 10 % de martensita. Se aplicaron 7 pasadas por junta.

Perfil de las temperaturas máximas en la ZAT: a 0.5 mm de distancia de límite de fusión, 1260 °C; a 1 mm, 1021 °C; a 2 mm, 743 °C y a 3 mm, 586 °C.

h - Probetas nº 501 - 502

Acero calidad C-75. Tubos sin costura, laminados en caliente. En pruebas realizadas con distintas velocidades de avance del electrodo, se observaron cantidades menores de 30 % de martensita en la ZAT. Para más de cuatro pasadas, se observa un cambio en la cantidad de martensita a 15 %, debido al precalentamiento de la pieza de hasta 120 °C, por el calor remanente de las pasadas previas. La junta mecanizada según AWS 1.1, es del tipo V, con un ángulo de 70°, según detalle de la Fig. 3.6.

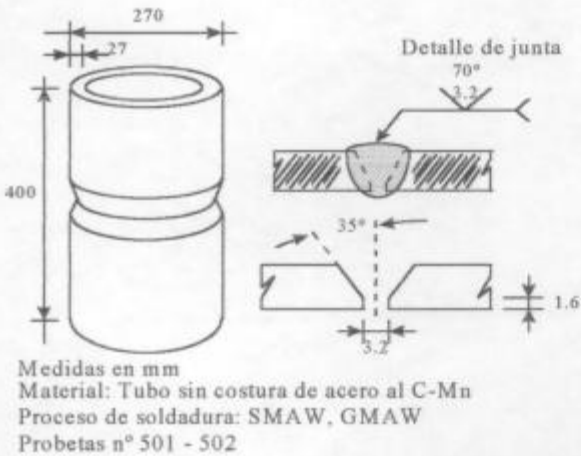


Fig. 3.6 - Probeta tubo.
Junta tipo V de 70°

Implante de falta de fusión, con soldadura SMAW, con electrodo de 2.5 mm de diámetro. Energía aportada 189 J/mm para una velocidad de avance de la torcha de 10 mm/s. Dilución 15 % (aporte del implante). Se observó falta de fusión de 80 %

en los implantes. Para mayores velocidades de avance del electrodo se observó falta de adherencia.

Soldadura de la unión: Junta mecanizada tipo V. Proceso automático GMAW. Electrodo de alambre de acero 1.6 mm de diámetro. Calidad AWS ER 70 S-6. Dilución en zona de junta 25 % (aporte del material base). Aleación resultante Acero tipo SAE 1010, no templable.

Para la soldadura de la junta, se utilizó dispositivo de sujeción con motor eléctrico y selector graduado para la rotación de la pieza, con lo cual se pudo operar con velocidad de giro predeterminada del conjunto. Para este caso, la torcha de alimentación del electrodo se mantuvo fija, variando el ángulo del cabezal para lograr cordones correctamente ubicados. La operación es compleja, pero asegura la obtención de cordones de soldadura en condiciones operativas controladas.

Por tratarse de una pieza de revolución, con eje de simetría con respecto al diámetro del tubo y a la junta soldada, no se observa distorsión.

- Probeta 501

Soldadura de raíz con proceso SMAW, con electrodo de 2.5 mm, calidad AWS E 6013, 30 volts, 80 amperes y 10 mm/s de avance de la torcha. Operando a una velocidad de 14 mm/s, se indujo una fisura de 120 mm de longitud en el centro del cordón de la raíz. La profundidad de la fisura se estimó en 2 mm. Posteriormente se procedió al cierre de la junta empleando proceso GMAW.

El cierre de la junta se realizó con un plan de 12 pasadas. Para el proceso GMAW se operó con 27 V, 220 A y velocidad de avance de la pieza 4 mm/s. Energía aportada 1336 J/mm. Espesor relativo calculado 1.15 (corresponde emplear cálculo de velocidad de enfriamiento para modelo tridimensional). Velocidad de enfriamiento promedio en la zona de transformación 34 °C/s. Por análisis metalográfico no se observan estructuras frágiles en probetas de ensayo y simulación del proceso.

Perfil de las temperaturas máximas en la ZAT: a 0.5 mm de distancia de límite de fusión, 1265 °C; a 1 mm, 1028 °C ;a 2 mm 750 ° C y a 3 mm, 593 °C.

- Probeta nº 502

Se procedió de idéntica forma que con la probeta 501. Soldadura de raíz por sectores, con proceso SMAW, con electrodo de 2.5 mm, calidad AWS E 6013, 30 volts, 80 amperes y 10 mm/s de avance de la torcha.

Se dejaron tramos para soldadura de raíz por proceso GMAW, para estudio de la penetración del arco.

La soldadura de la junta se realizó con un plan de 12 pasadas. Para el proceso GMAW se operó con 27 V, 220 A y velocidad de avance de la pieza 4

mm/s. Energía aportada 1336 J/mm. Espesor relativo calculado 1.15. Velocidad de enfriamiento promedio en la zona de transformación 34 °C/s. En la séptima pasada, por problemas operativos (mal funcionamiento del regulador de alimentación de gas), se produjo una zona de porosidad de 5 cm de longitud. Se contabilizaron 9 poros de diámetro variable entre 2 y 4 mm. Se decidió mantener dicho defecto para su estudio por ultrasonido. Luego se completaron las pasadas con proceso GMAW para la terminación de la junta.

Perfil de las temperaturas máximas en la ZAT: a 0.5 mm de distancia de límite de fusión, 1265 °C; a 1 mm, 1028 °C ;a 2 mm 750 ° C y a 3 mm, 593 °C.

Observaciones: La junta presenta sectores con falta de penetración en la raíz. Esto se logró variando la longitud del arco. De acuerdo a experiencias realizadas, operando con proceso GMAW automático, el arco es estable para alturas de 15 a 30 mm, según el tipo de junta a soldar. Para distancias menores de 15 mm, con las energías utilizadas, la torcha es rechazada por la fuerza del arco. El rechazo se evita operando a 25 volts y 100 amperes, pero no se logra una fusión adecuada del electrodo. Para distancias mayores a 30 mm, con altas energías el arco no es estable, produciéndose intermitencias en el encendido.

El estudio de la estabilidad del arco se realizó teniendo en cuenta la profundidad (34 mm), forma (tipo V) y dimensiones de la junta de las probetas 601 y 602, que dificultan el acceso de la torcha.

i - Probetas nº 601 - 602

Tubo sin costura. Acero calidad C-75, laminado en caliente. En pruebas realizadas con proceso SMAW con altas velocidades de avance del electrodo (14 mm/s), se observaron cantidades 20 a 30 % de martensita, con una dureza máxima de 340 HV en la ZAT. La velocidad de corte fue de 10 mm/s (por metalografía, en ZAT no se observó martensita para velocidades menores de 10 mm/s). Para el caso de mas de cuatro pasadas, el calor remanente se comporta como fuente de precalentamiento del orden de los 100 °C, con lo cual se logró controlar la formación de martensita y fisuración por hidrógeno

Placa soporte. Calidad SAE 1536. El acero presenta transformación martensítica para velocidades de avance del electrodo mayores de 12 mm/s. La máxima cantidad de martensita observada fue del 20 %. Dureza máxima 360 HV.

La junta mecanizada según AWS 1.1, es del tipo T. El ángulo del bisel del tubo es de 35 °, según detalle de la Fig. 3.7.



Fig. 3.7 - Probeta tipo tobera. Bisel de 35°

Implante de falta de fusión. Se efectuó con soldadura SMAW, con electrodo de 2.5 mm de diámetro. Energía aportada 189 J/mm para una velocidad de avance de la torcha de 10 mm/s. Dilución 15 % (aporte del implante). Se observó falta de fusión de 80 % en los implantes. Para mayores velocidades de avance del electrodo se produce falta de adherencia.

Soldadura de la raíz: Se realizó con proceso SMAW, con electrodo de 2 mm de diámetro, operando con 25 V y 60 A, con velocidades de avance de la torcha de 8 mm/s. Para velocidades menores, sistemáticamente se produce fusión del borde del bisel. Para velocidades mayores, no se logra la unión metalúrgica. Por observación directa aparecen sectores sin unión por soldadura. La soldadura de la raíz con proceso GMAW es dificultosa debido al diámetro de la torcha (35 mm), que impide el acceso correcto.

Perfil de las temperaturas máximas en la ZAT: a 0.5 mm de distancia de límite de fusión, 1265 °C; a 1 mm, 1028 °C; a 2 mm 750 °C y a 3 mm, 593 °C.

Para la soldadura de la junta por proceso GMAW automático, se utilizó el mismo dispositivo que el empleado con las probetas n° 501 y 502. En las primeras pasadas se operó con arco largo (28 mm).

- Probeta n° 601

Soldadura de la junta: Se operó con 28 volts, 230 amperes, velocidad de avance de la junta 7 mm/s, energía aportada 828 J/mm y un plan de 12 pasadas. Espesor relativo 1.79 (responde a modelo tridimensional). Velocidad de enfriamiento promedio en la zona de transformación 40.7 °C/s (considerando un precalentamiento de 120 °C por aprovechamiento del calor aportado por las pasadas previas). Por análisis metalográfico de una probeta de ensayo se observa una dilución de 30 % (aporte del material base), resultando un acero de 0.16 % de carbono, no templeable. Para velocidades menores de avance de la junta, los cordones son gruesos e impiden un aporte homogéneo. Además en este caso se observa falta de fusión lateral. Para altas velocidades, disminuye considerablemente

la energía aportada, aún operando en el límite de la máquina en lo referente a tensión e intensidad de la corriente para transferencia globular.

Perfil de las temperaturas máximas en la ZAT: a 0.5 mm de distancia de límite de fusión, 1108 °C; a 1 mm, 837 °C ;a 2 mm 567 ° C y a 3 mm, 431 °C.

Para este el tipo de geometría del conjunto y diseño de junta, por aplicación de la soldadura se produce distorsión en la placa base, que se manifiesta como una concavidad tomando como referencia el tubo.

- Probeta nº 602

Soldadura de la junta: Se operó con 26 volts, 220 amperes, velocidad de avance de la junta 7 mm/s, energía aportada 735 J/mm y un plan de 12 pasadas. Espesor relativo 1.9 (responde a modelo tridimensional). Velocidad de enfriamiento promedio en la zona de transformación 45 °C/s (considerando un precalentamiento de 100 °C por aprovechamiento del calor aportado por las pasadas previas). Para la dilución observada (30 % por aporte del material base), se tiene un acero de bajo carbono, no templable. En las pasadas 6 y 7, se indujo implante de escoria atrapada, empleando proceso SMAW.

Perfil de las temperaturas máximas en la ZAT: a 0.5 mm de distancia de límite de fusión, 1064 °C; a 1 mm, 789 °C ;a 2 mm 524 ° C y a 3 mm, 396 °C.

Luego de la soldadura, se observa distorsión en la placa base, que se manifiesta como una concavidad con respecto al tubo.

3.1.10 - Detalle de reflectores inducidos

Los reflectores de las probeta se registraron en croquis cuyo formato es habitualmente utilizado en el laboratorio de ultrasonido del CAC – CNEA, en base a la Fig. 3.8 y Fig. 3.9.

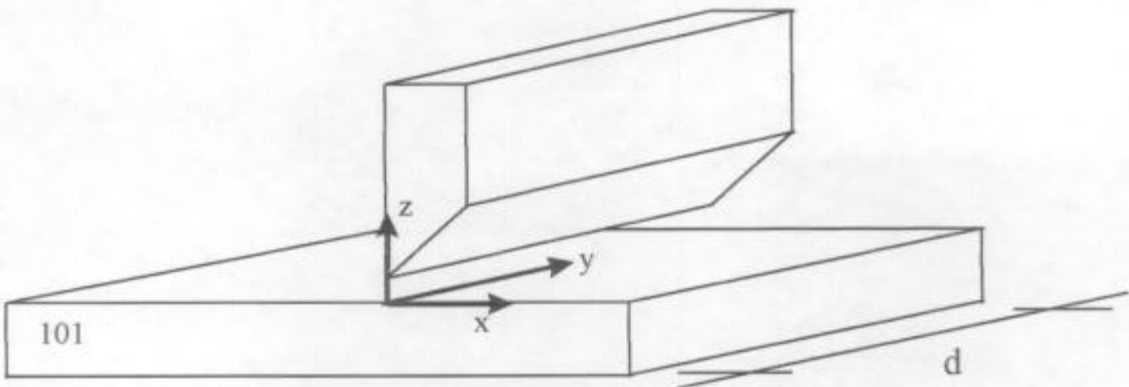


Fig. 3.8 - Identificación de las probetas y longitud del cordón de soldadura d.

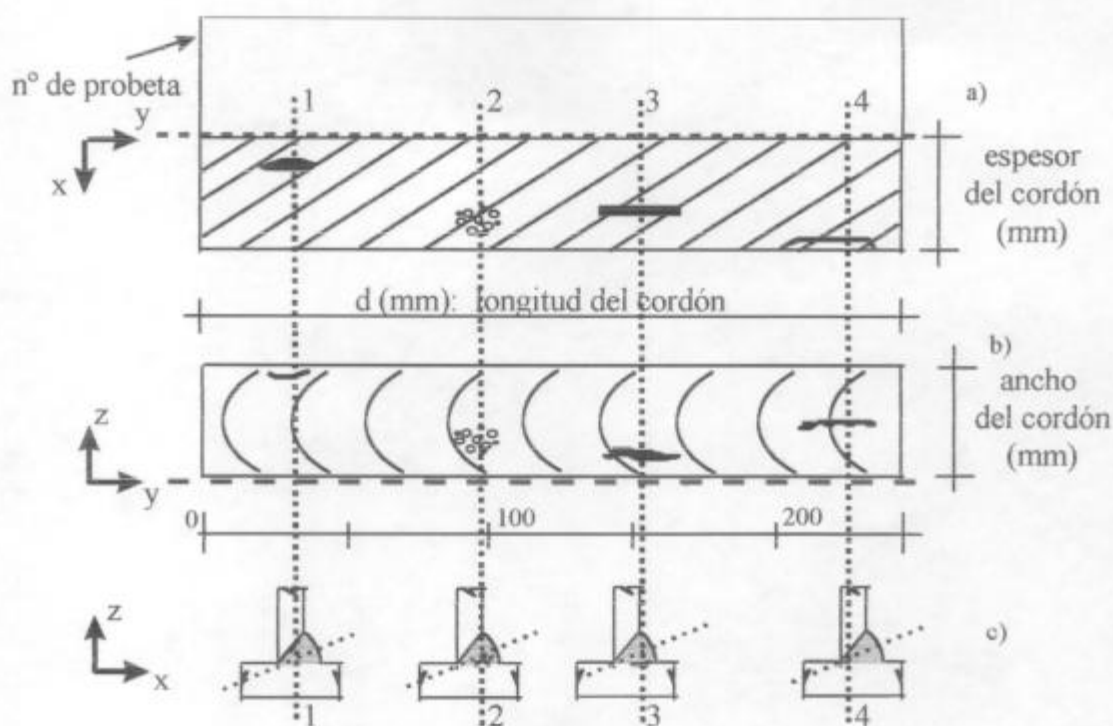


Fig. 3.9 - Registro de reflectores inducidos por soldadura
 1 y 3 - Falta de fusión; 2 - Porosidad; 4 Falta de penetración
 a) Vista en planta del cordón de soldadura b) Vista lateral
 c) Corte en zona de defecto.

3.2 - Detección y Caracterización de la Defectología por Ultrasonido

3.2.1 - Procedimiento para la detección y caracterización de la defectología

- Control de la calidad superficial y acondicionamiento de las superficies para ensayo de ultrasonido.

- Determinación del grado de atenuación de las ondas ultrasónicas

- Modificación de la estructura interna por tratamientos térmicos para modificar la atenuación.

- Calibración del sistema con patrones V1, V2 y calibres contruados con material de la pieza a controlar según ASTM E 164-94a, Standar Practice for Ultrasonic Contact Examination of Weldments.

- Determinación de la defectología por la técnica pulso-eco, digitalización de la señal característica con GAGESCOP y procesamiento con Matlab.

3.2.2 - Calibración del Sistema para Ensayo de Ultrasonido (14)

La calibración consiste en establecer condiciones de aptitud del conjunto de elementos que componen el sistema de ultrasonido (equipo generador-receptor, palpador, patrones, cables de conexión, etc.). El procedimiento de calibración es específico para cada calidad de acero, palpador y equipo y se basa en la norma ASTM E 164-94a, Standard Practice for Ultrasonic Contact Examination of Weldments. Los controles del instrumento se refieren a la verificación de la linealidad horizontal, límite de la escala de la línea de base-tiempo, linealidad y límite vertical de la pantalla, resolución, sensibilidad, nivel de ruido, ventana de la pantalla, precisión de los controles de ganancia. Las frecuencias de ensayo se establecen en base a las características estructurales y geométricas de las piezas a controlar y al método a emplear.

3.2.3 – Método de Exploración para Ensayo de Ultrasonido en Uniones Soldadas

Dado que el control de defectos en uniones soldadas se realiza con palpadores angulares, a continuación se describen los métodos de exploración más frecuentemente utilizados en la técnica de pulso-eco.

En la figura 3.12 se observa el procedimiento para el ajuste del $\frac{1}{2}$ paso y de 1 paso, cuando se opera con palpador angular.

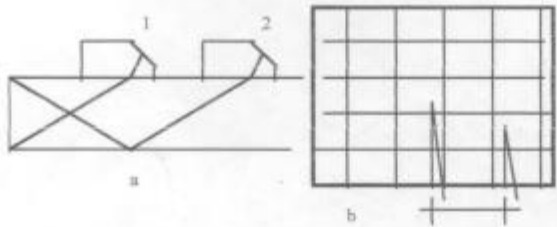


Fig. 3.12 - Determinación del paso con palpador angular
a - Posición del palpador
b - Ecos en el osciloscopio en la posición 1 y 2

En la Fig. 3.13 se observa el camino sónico para la detección de un defecto en un cordón de soldadura y el método utilizado para operación con palpador angular.

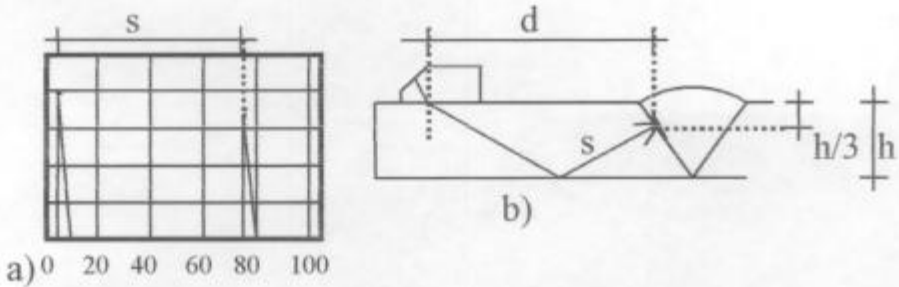


Fig. 3.13 - Ubicación de un reflector con palpador angular. a - Camino sónico "s"
b - Trazado del camino sónico "s" en la pieza soldada y distancia proyectada "d"

Para la detección y determinación de las dimensiones de discontinuidades en cordones de soldadura, cuando se emplea la técnica pulso-eco del ensayo de ultrasonido, se aplica un determinado tipo de desplazamiento del palpador (barrido). El barrido empleado se describe en la Fig. 3.14.

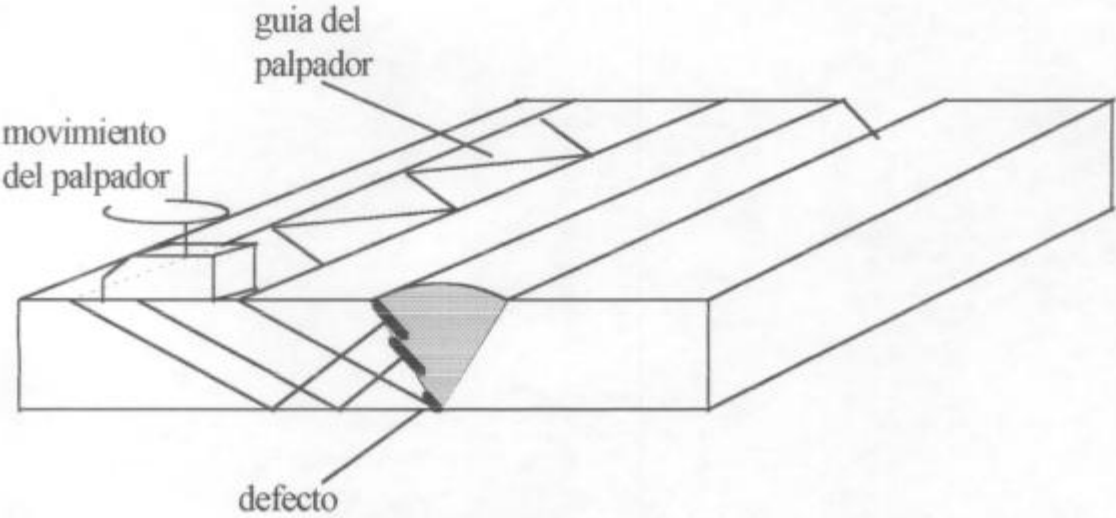


Fig. 3.14 - Ensayo de ultrasonido de un cordón de soldadura
Barrido con palpador angular

Es muy importante aplicar una exploración correcta. En la Fig. 3.15 se indica un tipo de error habitual que se comete en la operación de exploración de cordones de soldadura.

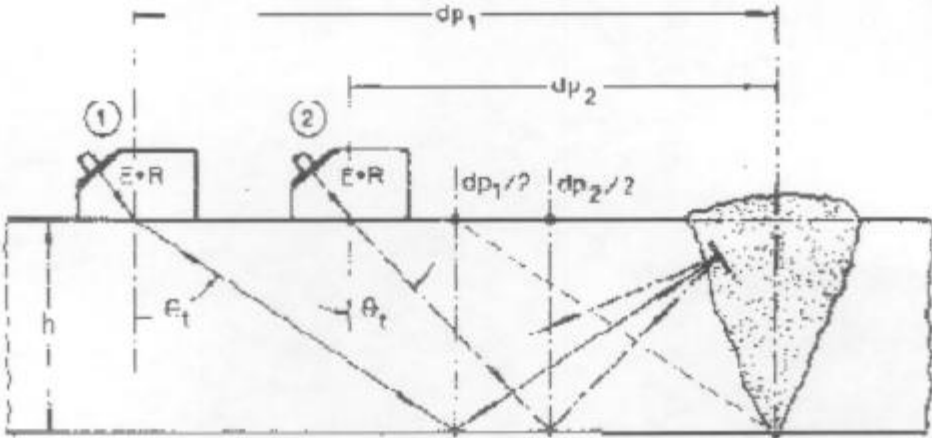


Fig. 3.15 - Desplazamiento del palpador para la detección de fallas en soldadura. 1) Ángulo correcto del haz. 2) Incorrecto

3.2.4 - Método DAC para detección de reflectores (14)

El método DAC (distancia - amplitud - corrección), permite fijar un nivel de referencia para evaluar un reflector (defecto o discontinuidad).

El método se basa en el uso de bloques de comparación de una geometría y calidad de acero similar al objeto de ensayo.

Los bloques tienen reflectores artificiales de determinado tamaño y forma que sirven para realizar la evaluación de discontinuidades reales por comparación directa.

Las dimensiones de los bloques de comparación se encuentran especificados en norma ASTM E 164-94a, Standar Practice for Ultrasonic Contact Examination of Weldments.

El procedimiento de evaluación de defectología según el método DAC es el siguiente:

- Ajuste del equipo de ultrasonido en recorrido. En general se considera un camino sónico que posibilite relevar al menos cinco ecos en la pantalla.

- Construcción de la curva de referencia. Se generan ecos de reflectores de comparación, sin variar la amplificación del equipo. Uniendo los picos de los ecos, se construye la curva DAC y se registra el valor de la amplificación máxima del eco de referencia (Fig. 3.16)

- Corrección de transferencia

Para compensar defectos de superficie o diferencias debido a la estructura, se realiza una corrección por transferencia, determinando previamente las pérdidas de sensibilidad ΔVT del objeto de ensayo con respecto al bloque de comparación. Se generan indicaciones de transmisión en V con dos palpadores angulares

similares, ajustando a la misma altura de pantalla. Se registran las dos amplificaciones (GT1 del bloque y GT2 del objeto de ensayo). La diferencia de amplificación ΔVT , es la corrección de transferencia que compensa efectos de superficie, atenuación, etc.

- Amplificación adicional ΔV (dB)

- Sensibilidad de registro GR (dB)

$$GR = GK + \Delta VT + \Delta V \quad (3.3)$$

GK: Amplificación del equipo, correspondiente al eco de referencia

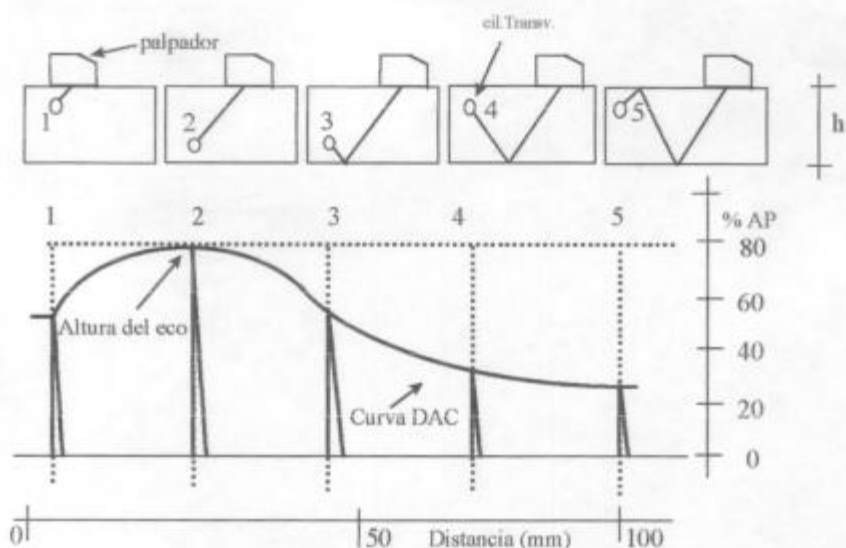


Fig. 3.16 - Procedimiento para trazado de curva DAC

- Descripción de reflectores

Todos los reflectores que llegan a la línea de referencia o la sobrepasa con la amplificación GR se registran, determinando la diferencia con respecto a la línea de referencia ΔHF (Fig. 3.17)

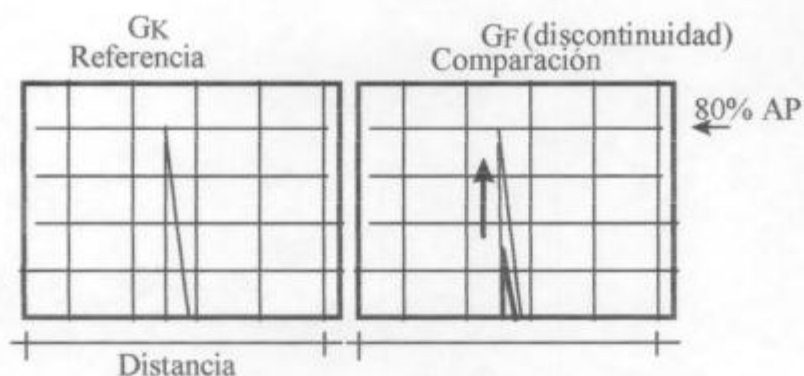


Fig. 3.17 - Amplificación de ecos de defectos

GK: Amplificación del equipo correspondiente al eco de referencia

GF: amplificación del eco de defecto a comparar a la altura de referencia

ΔVF : Diferencia de amplificación

$$\Delta VF = GF - (GK - \Delta V) = GF - GR = - \Delta HF \quad (3.4)$$

$$\Delta V = - \Delta H \quad (3.5)$$

Se registran todos los reflectores que llegan a la línea de referencia o la sobrepasan con la amplificación $GR - \Delta V$, indicando la diferencia con respecto a la

línea de referencia ΔHF en dB. El valor ΔHF se denomina sobrepaso del límite de registro (Fig. 3.18)

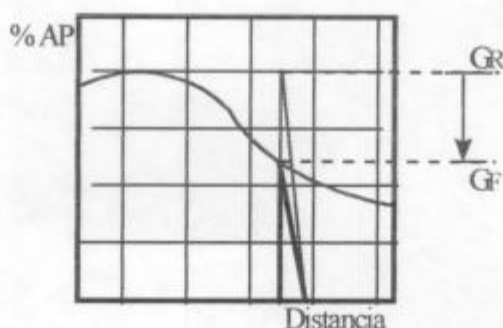


Fig. 3.18 - Sobrepaso del límite de registro

- Leyes de distancias y tamaños

Los reflectores ubicados en un campo acústico son incitados a oscilar y generan un campo de reflexión con características similares al campo de un palpador. El haz reflejado tiene una divergencia que depende de su tamaño y de la longitud de onda con la que es incitado a oscilar.

En la Fig. 3.19 se observa la sección del haz sonoro para diferentes reflectores, variando su distancia con respecto al palpador.

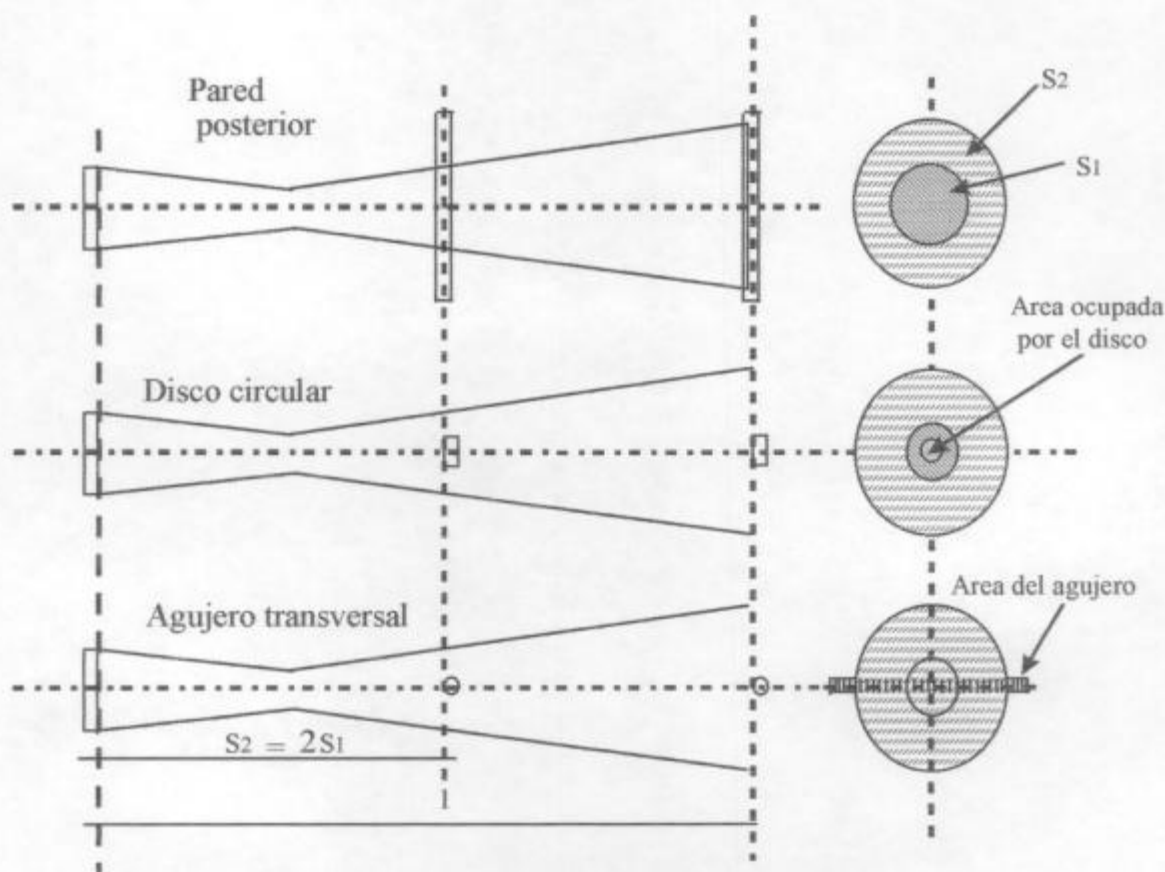


Fig. 3.19 - Reflectores en el campo sonoro

Para los reflectores ubicado en el campo sonoro, la descripción de los ecos se realiza de la siguiente manera (29):

Relación de alturas: H_2/H_1 H_1 : Altura de eco de referencia
 H_2 : Altura del eco a comparar

$$\Delta H = 20_{10} \log (H_2/H_1) \quad (2.48)$$

$$H_2 = H_1 \cdot 10^{(\Delta H/20)}$$

El campo reflejado hacia el palpador también depende de la orientación del reflector con respecto a la dirección del haz principal. En estas condiciones se establecen las leyes de distancias y tamaños para reflectores alcanzados en forma perpendicular por el haz ultrasónico (Tabla 3.1).

Variación	Pared posterior	Agujero transversal	Disco circular
Distancia al reflector (s = recorrido)	$H_2/H_1 = s_1/s_2$	$H_2/H_1 = (s_1/s_2)^{1.5}$	$H_2/H_1 = (s_1/s_2)^2$
Tamaño D = diámetro		$H_2/H_1 = (D_2/D_1)^{0.5}$	$H_2/H_1 = D_2/D_1^2$

Tabla 3.1 – Descripción de ecos de reflectores
Leyes de distancias y tamaños

- Curvas DAC de los materiales estudiados (14)

A efectos de evitar la corrección de transferencia, se construyeron bloques para calibración de los materiales estudiados, trazando posteriormente las curvas DAC, empleando palpador MWB45-N4, de acuerdo a lo siguiente:

- a) Acero C-75 - Espesor 27 mm - Diámetro exterior 273 mm
Bloque de calibración para tubos (Fig. 3.20)

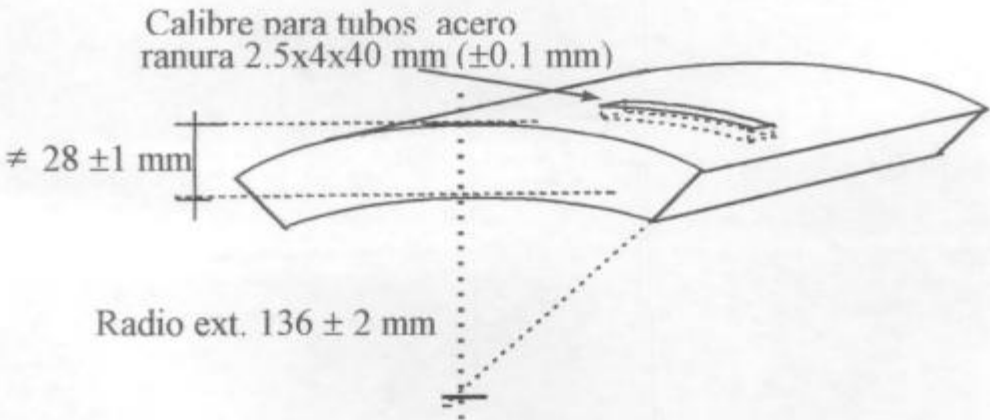
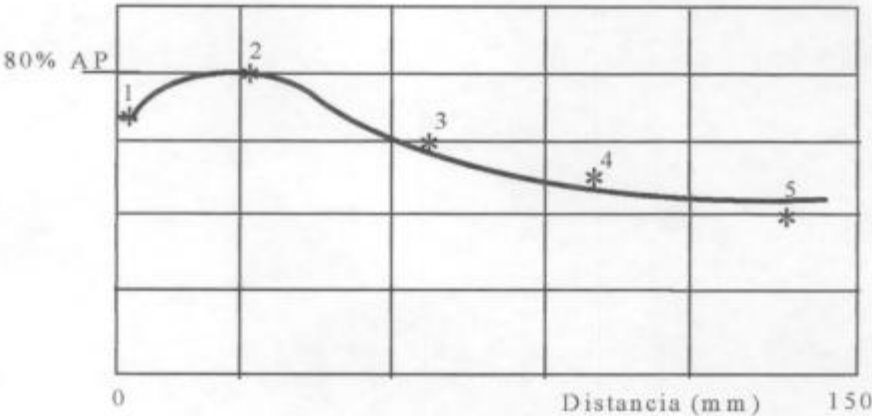


Fig. 3.20- Bloque para trazado de curva DAC (ASTM E 164-94a)

Los datos relevados y el trazado de la curva se observan en la Fig. 3.21

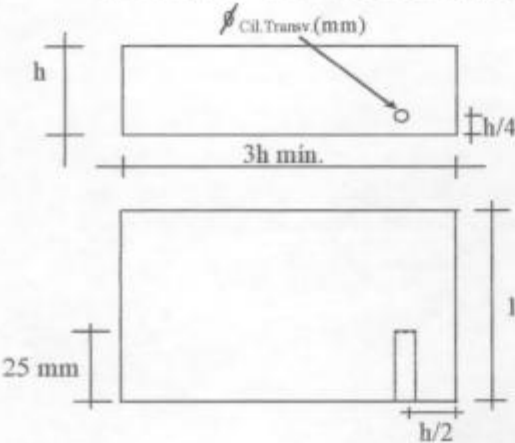


Acero C-95 - Espesor 27 mm - Prof. ranura 2.4 mm - Referencia + 38 dB

Posición del palpador	1	2	3	4	5
Distancia (mm)	3.5 ± 0.2	34.6 ± 0.2	73 ± 0.3	111 ± 0.3	149 ± 0.3
% Altura de pantalla	65	80	60	50	40

Fig. 3.21 - Curva DAC para tubos φ 270 mm
Tolerancia en amplitud 2%

b) Bloques de calibración para placas de acero (Fig. 3.22)



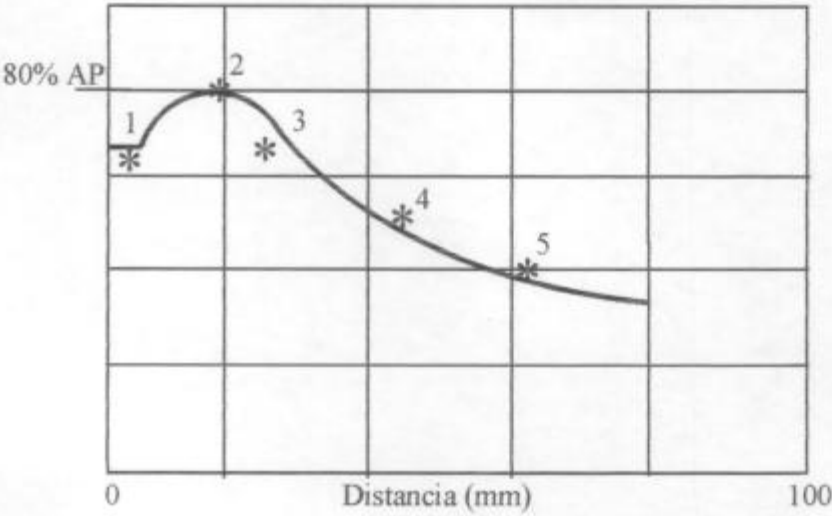
Acero SAE 1010 - $h = 20 \pm 1 \text{ mm}$
 $\phi_{\text{Cil. Transv.}} 2.4 \pm 0.1 \text{ mm}$

Acero SAE 4140 - $h = 25 \pm 1 \text{ mm}$
 $\phi_{\text{Cil. Transv.}} 2.4 \pm 0.1 \text{ mm}$

Acero SAE 1045 - $h = 30 \pm 1 \text{ mm}$
 $\phi_{\text{Cil. Transv.}} 3.2 \pm 0.1 \text{ mm}$

Fig. 3.22 - Bloques de calibración para placas de acero (14)

c) Curva DAC Acero SAE 1010 - Espesor 19.5 mm (Fig. 3.23)

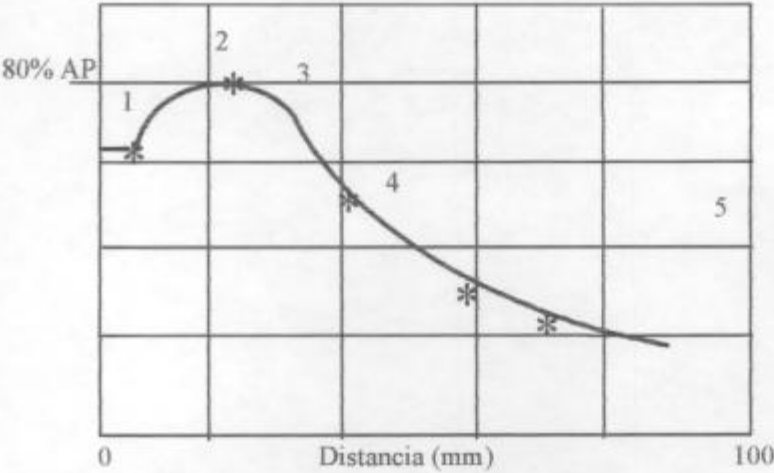


Espesor 19.5 mm - ϕ_{cil} 2.4 mm - Referencia + 42 dB

Posición del palpador	1	2	3	4	5
Distancia (mm)	5.6 ± 0.2	19.3 ± 0.2	33.5 ± 0.2	46.8 ± 0.2	60.5 ± 0.3
% Altura de pantalla	61	80	64	55	40

Fig. 3.23 - Curva DAC Acero SAE 1010
Tolerancia en amplitud 2 %

d) Curva DAC Acero SAE 4140 - Espesor 24 mm (Fig. 3.24)

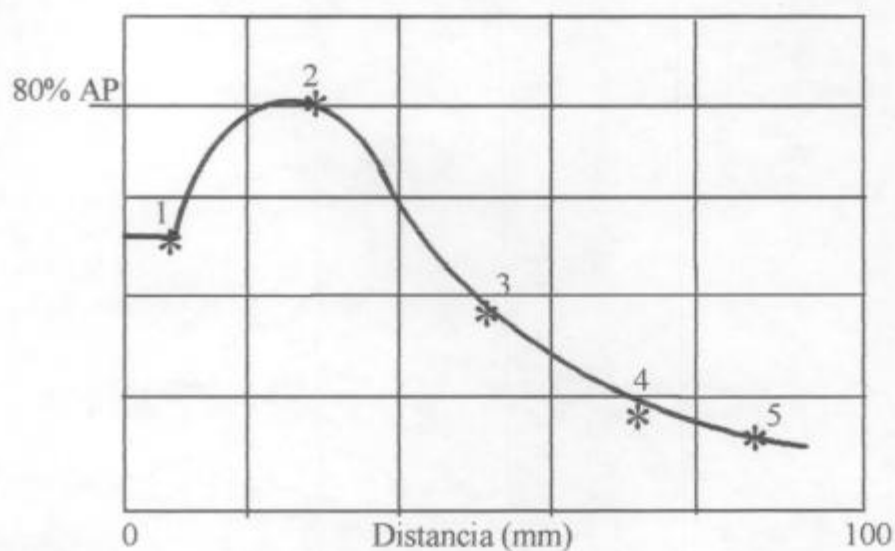


Espesor 24 mm - $\phi_{cil.Transv.}$ 2.4 mm - Referencia + 41.5 dB

Posición del palpador	1	2	3	4	5
Distancia (mm)	7.3 ± 0.2	24.1 ± 0.2	41 ± 0.2	57.9 ± 0.3	74.8 ± 0.3
% Altura de pantalla	63	80	52	27	23

Fig. 3.24 - Curva DAC Acero SAE 4140
Tolerancia an amplitud 2 %

e) Curva DAC Acero SAE 1045 - Espesor 31 mm (Fig. 3.25)



Espesor 31 mm - $\phi_{Cil.Transv.}$ 3.2 mm - Referencia + 35.5 dB

Posición del palpador	1	2	3	4	5
Distancia (mm)	9.3 ± 0.2	31.3 ± 0.2	53.2 ± 0.3	76.1 ± 0.3	86.1 ± 0.3
% Altura de pantalla	50	80	37	18	16

Fig. 3.25 - Curva DAC Acero SAE 1045
Tolerancia en amplitud 2 %

- Reflectores equivalentes

Los bloques de calibración contienen agujeros cilíndricos transversales para la calibración. Para determinar el tamaño equivalente de los reflectores en las piezas objeto del ensayo se debe realizar el siguiente cálculo:

$$D_{Circ.Plano} = \sqrt{\frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \lambda \cdot \sqrt{D_{Cil.Transv.} \cdot s}} \quad (3.6) \quad s: \text{distancia al reflector}$$

Con La ec. 3.6, se trazan curvas paramétricas para cada tipo de palpador, en función del diámetro del cilindro transversal del bloque de calibración (Fig. 3.26) (29)

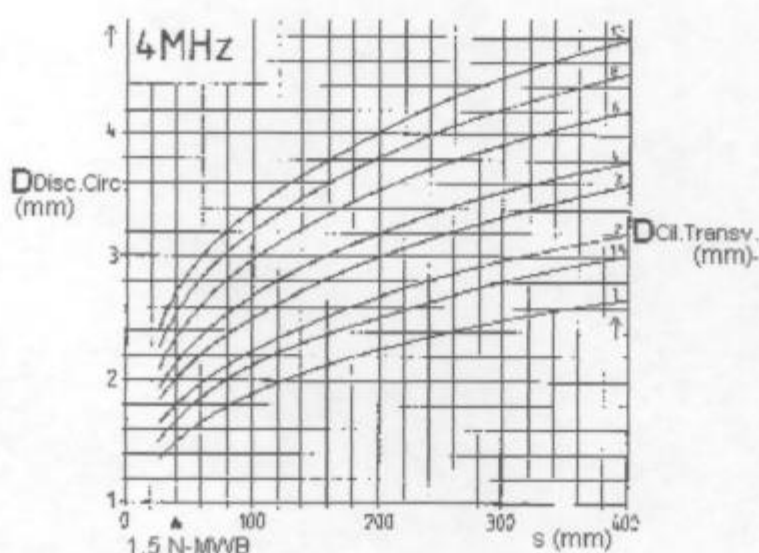


Fig. 3.26 - Equivalencias entre Reflectores Cilíndrico DCil.Transv. - Circular plano DDisc.Cir

- Evaluación de las dimensiones de reflectores (método de exploración dinámica o de valores medios)

Para conocer aproximadamente la superficie de reflexión, se utiliza el criterio por el cual se produce una caída de 6 dB en la amplitud de la señal ultrasónica maximizada del reflector. Se mide la extensión de la superficie que produce dicha caída, de acuerdo a lo descrito en Fig. 3.27.

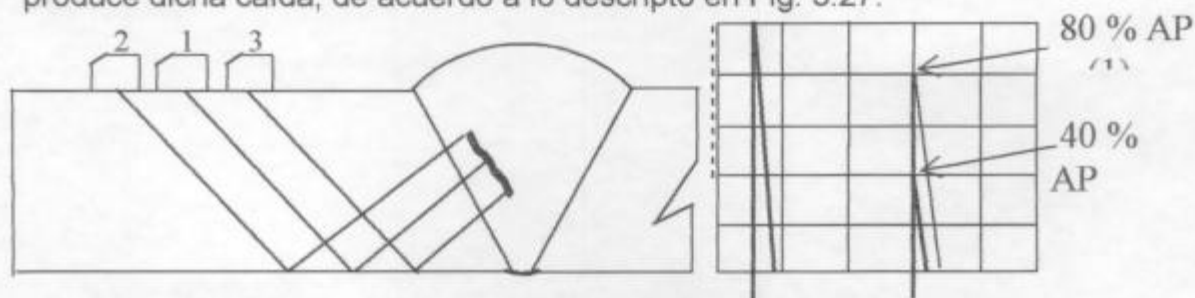


Fig. 3.27 - Determinación de la superficie de reflectores

- Error en la medición de reflectores

El sistema de medición, está referido a los siguientes reflectores:

Para espesores mayores de 20 mm, reflectores de superficie cilíndrica transversal $D_{\text{Cil. Transv.}} = 3.2 \text{ mm}$, el reflector circular equivalente fondo plano es $D_{\text{Disc. Cir.}} = 2 \text{ mm}$

Para espesores de 20 mm, reflectores de superficie cilíndrica transversal $D_{\text{Cil. Transv.}} = 2.4 \text{ mm}$, el reflector circular equivalente fondo plano es $D_{\text{Disc. Cir.}} = 1.9 \text{ mm}$

La determinación de los errores de la técnica se realiza por medición de reflectores de diferentes dimensiones. Las diferencias se determinan comparando los valores medidos con un calibre de metrología (pie de rey), con las determinaciones realizadas con la técnica de ultrasonido de pulso-eco. Los resultados son los siguientes:

Para reflectores equivalentes de diámetro circular fondo plano de hasta 4 mm ($D_{\text{Disc. Cir.}}$), las diferencias llegan hasta un 7 %.

Para reflectores equivalentes de diámetro circular fondo plano mayores de 4 mm ($D_{\text{Disc. Cir.}}$), las diferencias llegan hasta un 5 %.

Los valores medidos para la determinación de los errores, son coincidentes para los palpadores utilizados (normal y de 45°)

Los valores medidos con calibre pie de rey, considerados como de referencia (reales), son menores que los valores medidos con el ultrasonido. Los factores que contribuyen a la aparición de estas diferencias, están relacionados con la divergencia del haz ultrasónico, el acoplamiento, la rugosidad de la superficie, la atenuación del material, etc.

3.3 - Procesamiento de la Señal Ultrasónica

Una de las consecuencias de la interacción de las ondas ultrasónicas con la estructura interna y las discontinuidades del material, es la reflexión del haz que es recibida por el palpador. El palpador transforma la señal ultrasónica en señal eléctrica y envía dicha señal al equipo generador-receptor (Krautkramer USD 15 S digital). La señal eléctrica aparece en la pantalla del equipo en el modo onda rectificada completa.

Operando los comandos del equipo se ajustan las características de la señal (amplitud, posición, etc.). Luego se coloca la señal en modo RF de ecos sin rectificar (Fig. 3.28), observándose claramente la inversión de fase y la amortiguación en el tiempo de la oscilación del cristal en su frecuencia de resonancia.

La señal RF (Fig. 3.28), presenta una simetría de la parte positiva y negativa de la amplitud y se desarrolla aproximadamente en el centro de la pantalla.

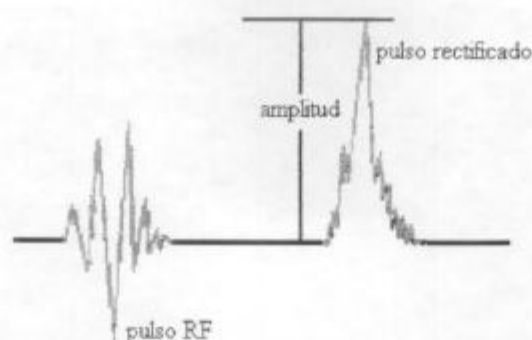


Fig. 3.28 - Señal del pulso en modo RF y onda rectificada

Utilizando una plaqueta GAGESCOPE, instalada en una PC Pentium MMX 200, se procede a la adquisición de la imagen desplegada en la pantalla del equipo de ultrasonido, correspondiente al reflector en cuestión. En Tabla 3.2, se indican las condiciones operativas para la digitalización de la señal. La adquisición finaliza cuando se digitaliza el último dato de la señal. Luego se guarda la información en números binarios, en archivos *.sig. (37)

Sensibilidad	500 mV
Resolución	8 bits
Buffer	8000 bytes
Velocidad de muestreo	50 MSPS
Average	10
Trigger	1 V

Tabla 3.2 - Condiciones de adquisición de señales de ultrasonido con plaqueta GAGESCOPE

Una vez almacenados los archivos *.sig, se ejecuta el programa prepos.m desarrollado en Matlab (Anexo III) y se selecciona aquel cuyo procesamiento se requiere, observando en el monitor de la PC el gráfico de la señal digitalizada para su análisis. Con el Mouse se posiciona el cursor en el máximo de un eco a analizar, con lo que el programa selecciona el máximo absoluto del eco y aplica la ventana de Hanning según la ec. 3.7 (Fig. 3.29)

$$\text{Hann}(f) = 0.5 \left[1 + \cos \left(\frac{\pi f}{f_m} \right) \right] \text{ para } |f| \leq f_m \quad (3.7)$$

$$= 0 \text{ para } |f| > f_m$$

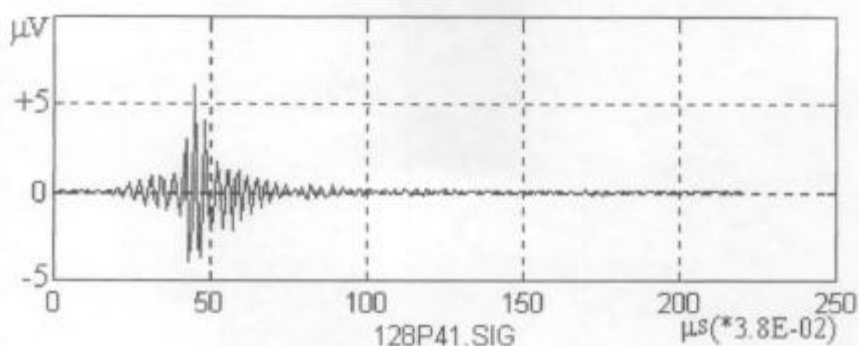


Fig. 3.29 - Ventana de Hannig para análisis
Señal ultrasónica digitalizada

Para lograr mayor precisión en el análisis, frecuentemente se trabaja con la envolvente de la señal, lo cual es especificado en normas. En este caso para la demodulación de la señal de ultrasonido en RF (Fig. 3.30), se recurre a la transformada de Hilbert: $H(f) = -j \operatorname{sgn}(f)X(f)$ con $\operatorname{sgn}(f) = 1$ para $f > 0$
 $= -1$ para $f < 0$

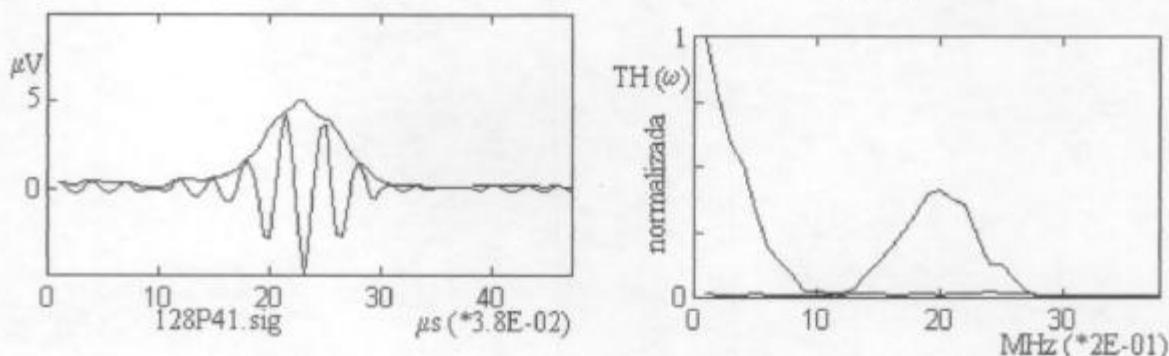


Fig. 3.30 - Transformada de Hilbert para detección de la
envolvente de una señal de US RF sin distorsión

Si bien se opera con señales ultrasónicas discontinuas, es posible observar señales continuas aplicando una interpolación del tipo spline. (Fig. 3.31)

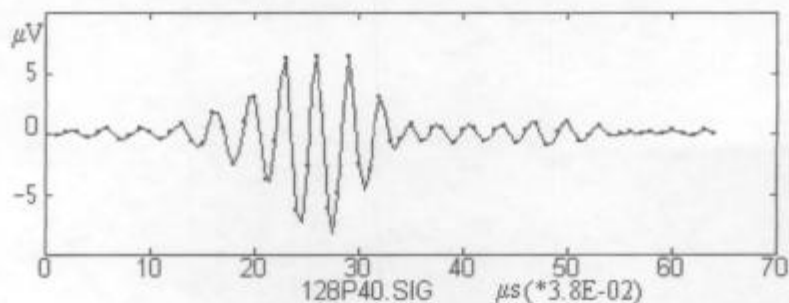


Fig. 3.31 - Señal interpolada por una función Spline

Para posibilitar el desarrollo de redes neuronales, cuando se aplica la transformada FFT (que no considera la variable temporal) (ec. 3.8), no se observan

diferencias apreciables para los distintos tipos de reflectores. Esto se debe a que la FFT es aplicable con buenos resultados a componentes estacionarias durante el período de análisis, con lo que se pierde información referente a la naturaleza o forma de las reflexiones y por lo tanto no se presenta una situación favorable para el desarrollo de inteligencia artificial por redes neuronales.

Transformada de Fourier

$$\text{FFT}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (3.8)$$

Para realizar un análisis que describa mejor señales no estacionarias se empleó la transformada tiempo-frecuencia de Wigner-Ville (ec. 3.9) (30), con lo que se logró obtener espectrogramas con gráficos diferentes, tales que esta base de datos presenta mejores posibilidades para el desarrollo de inteligencia artificial por redes neuronales que la obtenida con la transformada FFT.

Transformada de Wigner-Ville

$$\text{WV}(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t + \tau/2) S^*(t - \tau/2) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (3.9)$$

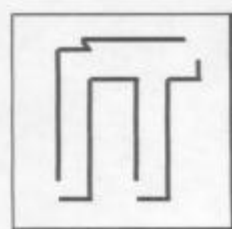
* Función conjugada de S

S(t): Señal analítica de la señal real de x(t), definida por $S(t) = x(t) + jH[x(t)]$

H[x(t)]: Transformada de Hilbert de x(t) (38)

4

RESULTADOS EXPERIMENTALES



4- RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1 - Probetas Construidas

En la Fig. 4.1 se observa el conjunto de probetas de acero construidas por soldadura eléctrica de arco con reflectores inducidos. Los reflectores estudiados son de dimensiones mayores de 3x3 mm.

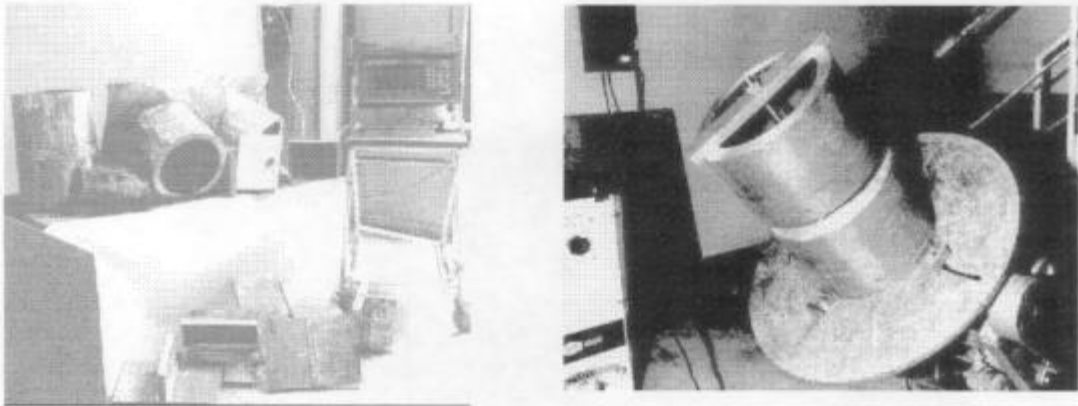
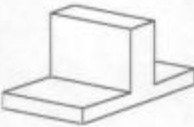
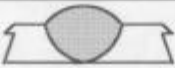


Fig. 4.1 - Probetas de acero con reflectores inducidos por soldadura

El detalle de probetas construidas se consigna en Tabla 4.1

Nº	Forma de la probeta y calidad de acero	Tipo de junta	Dimensiones (mm) Tolerancias ± 1 mm	Peso (Kg)
101 102 103	 SAE 1010		300x200x150x20	15
104 105 106	 SAE 1010		300x230x20	14
201	 SAE 1045		300x230x25	15

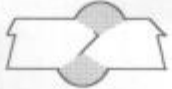
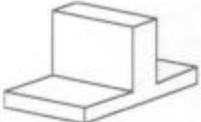
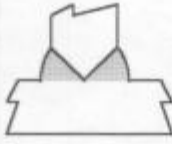
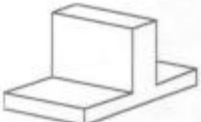
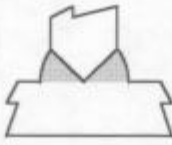
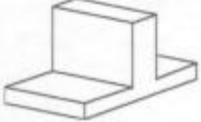
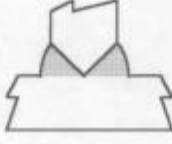
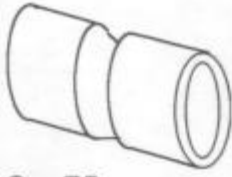
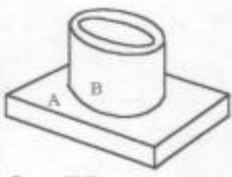
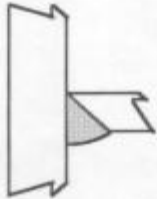
Nº	Forma de la probeta y calidad del acero	Tipo de junta	Dimensiones (mm) Tolerancias ± 1 mm	Peso (Kg)
301 302 304	 SAE 1045		300x200x30	16
126 127 128	 SAE 1045		300x200x150x25	18
129	 SAE 1045		300x200x150x30	25
411 412 413 414 415 416	 SAE 4140		315x200x110x25 235x150x75x25 240x150x75x25 305x150x75x25 325x200x100x20 215x125x75x25	19 10 10 14 15 8
501 502	 C - 75		400x ϕ 300x30	61
601 602	 C - 75		A 450x450x20 B 200x ϕ 300x30	61

Tabla 4.1 - Detalle de probetas para ensayo de ultrasonido

4.2 - Detección de Reflectores

La detección de la defectología inducida se realizó empleando el ensayo de ultrasonido con la técnica de pulso-eco, descrita en el capítulo 3. Los resultados obtenidos se consignan en Tabla 4.2.

Probeta Nº	Reflector Nº	Tipo de Reflector	Dimensiones del reflector (mm) Tolerancias ± 1 mm		ΔH (dB)	Proceso de Soldadura
			Previo al cierre del cordón	Medición por ultrasonido (en probetas soldadas)		
101	1	LOP	Inducción directa	3X15	9.1	SMAW
	2	LOF	Implante 8x12	4X8	8.2	GMAW
	3	I	Inducción directa	4X5	6.2	SMAW
102	1	P	Inducción directa	5X12	10.1	GMAW
	2	LOP	Inducción directa	3X20	8.6	GMAW
103	1	LOP	Inducción directa	3X15	10.1	SMAW
	2	I	Inducción directa	4X7	9.2	SMAW
104	1	LOF	Implante 8x12	5X8	7.5	SMAW
	2	LOP	Inducción directa	3X10	8.4	GMAW
	3	I	Inducción directa	4X6	8.1	SMAW
201	1	LOF	Implante 8x12	5X9	9.4	SMAW
	2	P	Inducción directa	4X7	7.9	GMAW
301	1	LOF	Implante 8x12	5X10	10.4	SMAW
	2	LOP	Solapado de bisel	9X100	12.1	GMAW
	3	I	Inducción directa	6X8	10.8	SMAW
302	1	LOP	Solapado de bisel	8X80	13.1	GMAW
	2	P	Inducción directa	4X4	6.3	GMAW
304	1	LOP	Solapado de bisel	7X90	13.1	GMAW
	2	P	Inducción directa	6X6	8.7	GMAW
126	1	LOF	Implante 12x16	9X11	11.5	SMAW
	2	LOF	Implante 12x16	8X11	11	SMAW
	3	P	Inducción directa	5X6	7.6	SMAW
	4	LOP	Inducción directa	3X10	8.5	GMAW
127	1	LOF	Implante 12x20	8X12	12	SMAW
	2	LOP	Inducción directa	3X10	8.1	GMAW

Probeta nº	Reflector nº	Tipo de Reflector	Dimensiones del reflector (mm) Tolerancias ± 1 mm		ΔH (dB)	Proceso de Soldadura
			Previo al cierre del cordón	Medición por ultrasonido (en probetas soldadas)		
128	1	P	Inducción directa	3X3	4.2	SMAW
	2	P	Inducción directa	4X4	6.1	SMAW
	3	LOP	Inducción directa	7X12	11.3	GMAW
	4	LOP	Inducción directa	5X7	9.2	GMAW
129	1	LOF	Implante 12 x 20	9X15	13	SMAW
	2	LOP	Inducción directa	3X10	8.7	GMAW
	3	LOF	Inducción directa	8X17	12.1	GMAW
411	1	LOF	Implante 12x10	7X12	11.4	SMAW
	2	LOF	Implante 12x10	8X14	12	SMAW
	3	I	Inducción directa	4X7	8.5	SMAW
412	1	P	Inducción directa	5X4	6.7	GMAW
	2	I	Inducción directa	3X6	5.9	SMAW
	3	LOF	Implante 12x20	10X12	13.5	SMAW
	4	LOF	Implante 12x20	9X12	12.1	SMAW
413	1	P	Inducción directa	6X7	8.7	GMAW
	2	LOF	Implante 12x20	8X12	11.8	SMAW
	3	LOP	Inducción directa	4X14	10	GMAW
414	1	LOF	Implante 12x20	8X12	11.7	SMAW
	2	I	Inducción directa	4x8	8.9	SMAW
	3	P	Inducción directa	5X5	7.7	GMAW
	4	LOF	Implante 12x20	7X10	12.1	SMAW
415	1	LOF	Implante 15x20	12X15	15	SMAW
	2	LOF	Implante 15x20	12X15	14	SMAW
	3	LOP	Inducción directa	3X7	6.2	GMAW

Probeta nº	Reflector nº	Tipo de reflector	Dimensiones del reflector (mm)		ΔH (dB)	Proceso de soldadura
			Tolerancias ± 1 mm			
			Previo al cierre del cordón	Medición por ultrasonido (en probetas soldadas)		
416	1	LOF	Implante 12x20	10X14	13.2	SMAW
	2	LOF	Implante 12x20	9X12	12	SMAW
	3	P	Inducción directa	6X8	9.8	SMAW
501	1	LOF	Implante 12x20	8X12	14	SMAW
	2	LOF	Implante 12x20	9X10	12.3	SMAW
	3	LOF	Implante 12x20	10X11	13.2	SMAW
	4	LOP	Inducción directa	3X20	11.6	GMAW
	5	I	Inducción directa	5X7	8.1	SMAW
502	1	LOF	Implante 12x20	10X15	12.3	SMAW
	2	LOF	Implante 12x20	10X13	13.2	SMAW
	3	LOP	Inducción directa	3X70	11.4	GMAW
	4	LOF	Implante 12x20	11X12	14.1	SMAW
	5	LOF	Implante 12x20	9X17	12.7	SMAW
	6	P	Inducción directa	7X40	13.2	GMAW
601	1	LOF	Implante 12x20	7X12	12.1	SMAW
	2	LOF	Implante 12x20	10X15	14	SMAW
	3	P	Inducción directa	5X12	108	GMAW
	4	LOP	Inducción directa	4X25	13	GMAW
	5	LOF	Implante 12x20	10X15	12.7	SMAW
602	1	LOF	Implante 12x20	8X12	13.2	SMAW
	2	LOF	Implante 12x20	7X12	12.3	SMAW
	3	I	Inducción directa	4X8	7.8	SMAW
	4	LOP	Inducción directa	3X60	11.1	GMAW
	5	LOF	Implante 12x20	6X11	12.1	SMAW
	6	LOF	Implante 12x20	7X14	12.8	SMAW

Tabla 4.2 - Detalle de reflectores inducidos por soldadura eléctrica de arco en probetas de acero y detección por ensayo de ultrasonido

La precisión de las mediciones realizadas para las determinaciones de las dimensiones de los reflectores es la siguiente:

Tolerancias en amplitud (determinaciones de H1 y H2 en dB): 2 %

Tolerancia en la medición de las dimensiones de reflectores (según lo establecido en capítulo 3; punto 3.2.3; pag. 95): 5 % para reflectores equivalentes DDisc.Cir. fondo plano mayores de 4 mm de diámetro y 7 % para reflectores equivalentes DDisc.Cir. fondo plano de hasta 4 mm de diámetro .

El significado de la nomenclatura empleada en Tabla 4.2, es la siguiente:

Probeta nº: Identificación de la probeta (numérica) en la parte izquierda, tomado como referencia el cordón de soldadura.

Defecto nº: Indica de manera secuencial la ubicación del defecto a lo largo del cordón de soldadura (Ver Fig. 3.9)

Tipo de reflector

- LOF: Falta de fusión
- LOP: Falta de penetración
- P : Porosidad
- I : Inclusiones de escoria

Dimensiones del reflector: Cuando el haz ultrasónico incide sobre una discontinuidad, esta se comporta como un reflector del haz. La exploración que se realiza, tomando como referencia la curva DAC correspondiente al material ensayado y el criterio de caída del eco en 6 dB, permite establecer los límites del reflector, que se consignan en el informe.

Implante: Placas de acero SAE 1010 de 4 ± 0.2 mm de espesor

Inducción directa: Se induce la discontinuidad (reflector), por proceso de soldadura

Medición por ultrasonido (en probetas soldadas): Se realiza según lo descrito en punto 3.2.3, pag. 96.

ΔH (dB) = $20 \log_{10} (H_2/H_1)$ (2.48). H₂: Altura del eco de referencia

H₁: Altura del eco del defecto (reflector)

SMAW: Proceso de soldadura de arco eléctrico con electrodo revestido.

GMAW: Proceso de soldadura de arco eléctrico con protección gaseosa. Variante empleada: Protección del arco con gas activo CO₂ y desplazamiento automático del electrodo.

4.3 - Registro de la Información

Reflectores inducidos por soldadura y detección por ultrasonido

Para el registro de la información relevada de los reflectores inducidos en cada probeta por soldadura y detectada por ultrasonido, se utilizó un sistema de coordenadas cartesianas y un croquis de referencia. En esta documentación no se consignaron las indicaciones imprevistas, que constituyen alrededor de un 15 % del total.

Los casos representativos de la información registrada se indican en Figs. 4.2 a 4.6, de acuerdo a lo siguiente:

Probeta nº 101 - Junta V - 45° - SAE 1010

Reflector nº	Tipo	Coordenadas (mm) Tolerancias ± 1 mm		
		x	y	z
1	LOP	0	25	0
2	LOF	5	80	3
3	I	5	95	45

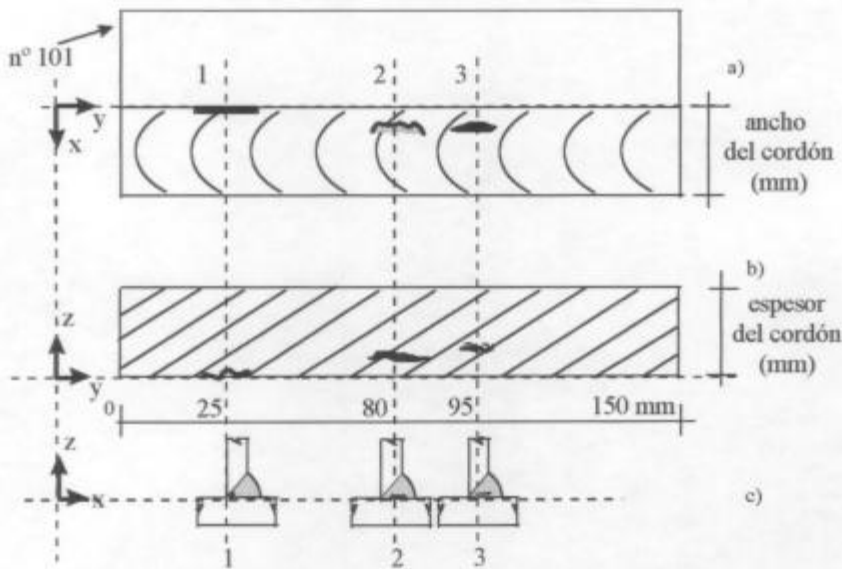


Fig. 4.2 - Registro de la información de la probeta nº 101

Probeta nº 201 - SAE 1045 - Junta V - 60°

		Coordenadas (mm) Tolerancias ± 1 mm		
Reflector nº	Tipo	x	y	z
1	LOF	- 5	70	10
2	P	4	120	15

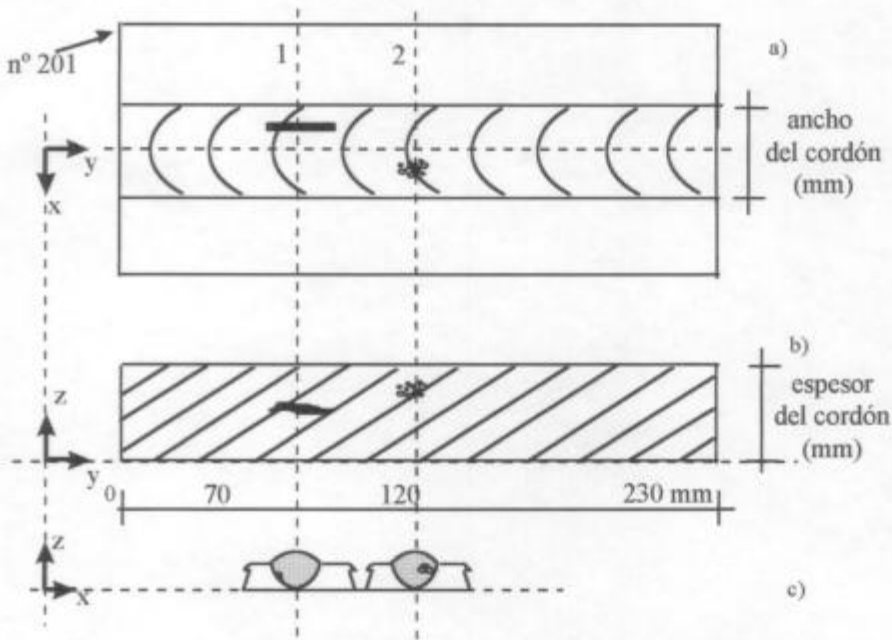


Fig. 4.3 - Registro de la información de la probeta nº 201

Probeta nº 128 - SAE 1045 - Junta K - 45 °

		Coordenadas (mm) Tolerancias ± 1 mm		
Reflector nº	Tipo	x	y	z
1	LOP	0	45	0
2	LOF	- 6	70	7
3	P	7	95	8
4	P	7	160	6

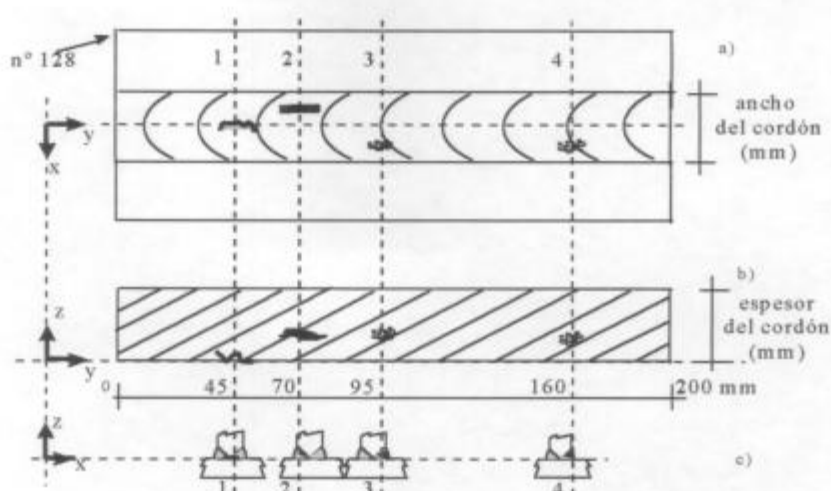


Fig. 4.4 - Registro de la información de la probeta n° 128

Probeta n° 502 - C - 75 - Junta K - 70° (tubo)

Reflector n°	Tipo	Coordenadas (mm)		
		Tolerancias ± 1 mm		
		x	y	z
1	LOF	11	80	12
2	LOF	12	315	- 10
3	LOP	0	420	0
4	LOF	9	530	9
5	P	7	610	7
6	LOF	8	710	8

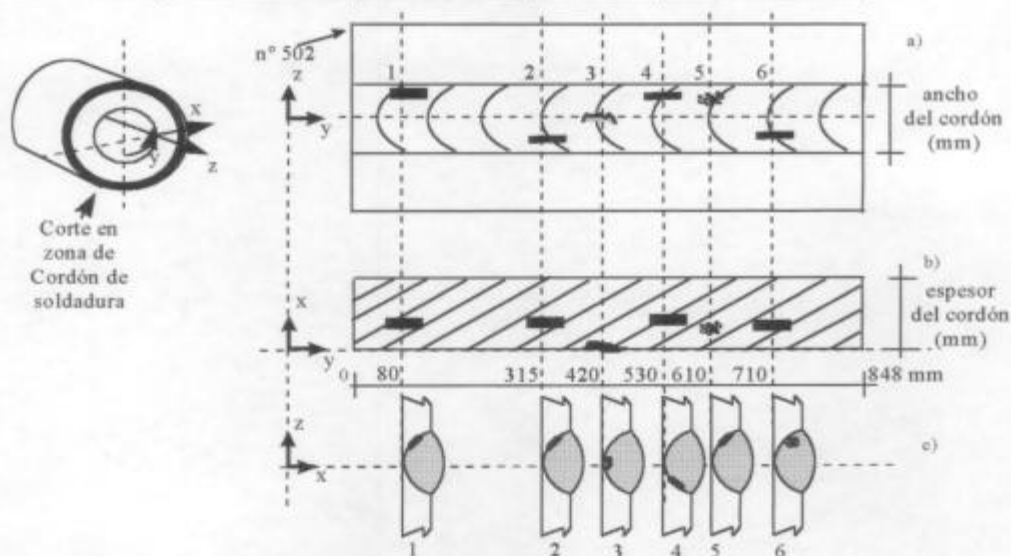


Fig. 4.5 - Registro de la información de la probeta n° 502

Probeta n° 601 - C-75 - Junta V - 45°

Reflector nº	Tipo	Coordenadas (mm) Tolerancias ± 1 mm		
		x	y	z
1	LOF	7	70	8
2	LOF	9	300	6
3	P	11	520	80
4	LOP	0	600	0
5	LOF	8	710	8

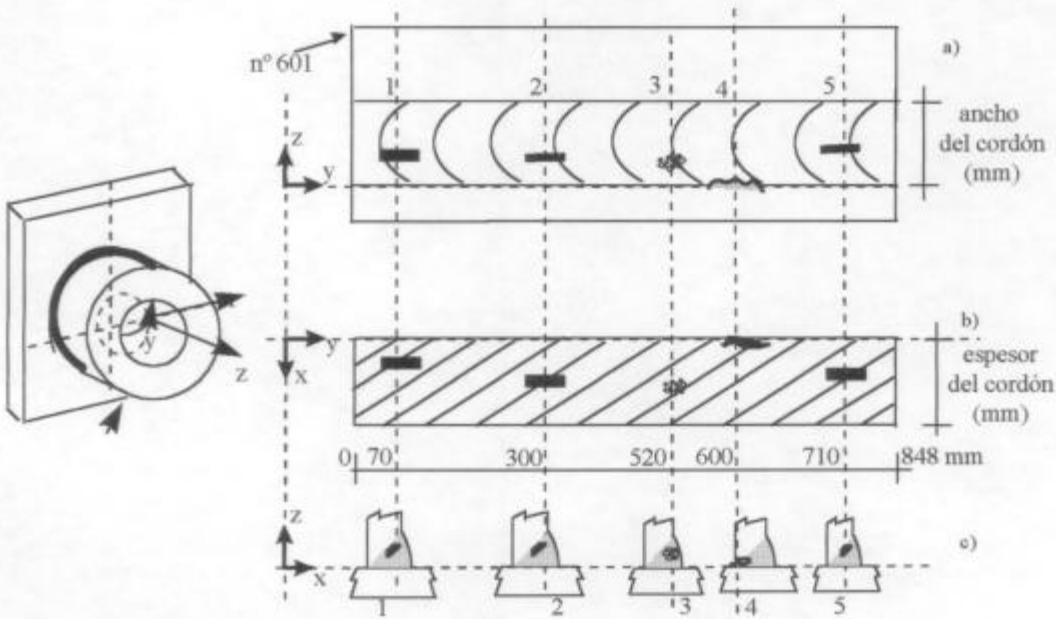


Fig. 4.6 - Registro de la información de la probeta nº 601

Nota: En las Figs. 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 y 4.6, a) es una vista en planta de la zona del cordón de soldadura, b) vista lateral, c) corte de la sección en la posición del reflector.

Observaciones: En Anexo IV se presentan las radiografías de reflectores característicos LOP, LOF, P, I.

4.4 - Procesamiento de la Señal de Ultrasonido de Reflectores

Para el procesamiento de la señal de ultrasonido, se procedió de acuerdo a lo establecido en 3.3, de la siguiente manera:

a - Obtención de la señal ultrasónica de una discontinuidad en modo RF (Fig. 4.7)

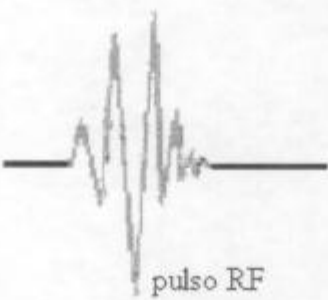


Fig. 4.7 - Señal ultrasónica de un reflector en modo RF

b - Digitalización de la señal de ultrasonido del reflector (Fig. 4.8)

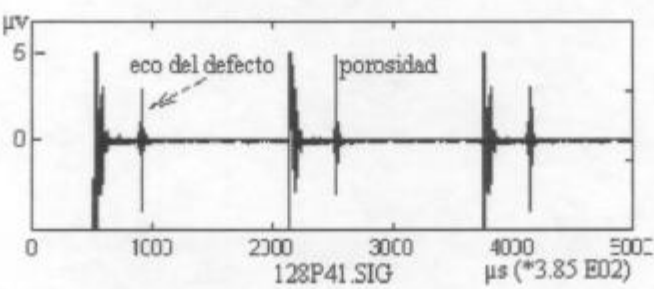


Fig 4.8 - Señal ultrasónica digitalizada

c - Aplicación de Ventana de Hanning y de la FFT (Fig. 4.9)

Transformada de Fourier

$$FFT(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (3.8)$$

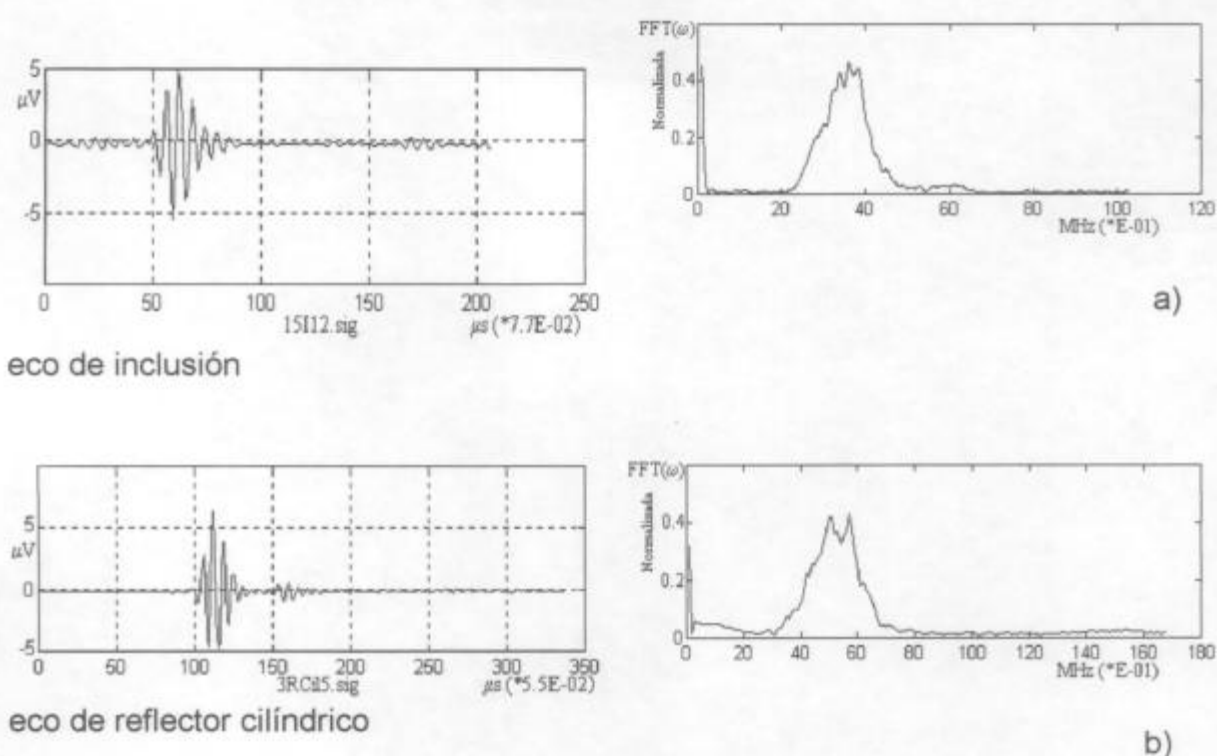


Fig. 4.9 – FFT de diferentes reflectores

a) - Eco y FFT de inclusión

b) - Eco y FFT de un reflector artificial (agujero transversal cilíndrico)

Analizando la Fig. 4.9, no se observan diferencias apreciables en las figuras de la FFT. Esta situación se produce en general, en todos los casos. Por esta razón, de acuerdo a lo establecido en capítulo 3, punto 3.3, se aplica la siguiente secuencia de procesamiento:

a - Obtención de la señal ultrasónica de una discontinuidad en modo RF

b - Digitalización de la señal de ultrasonido del reflector

c - Aplicación de la ventana de Hanning y transformada de Wigner-Ville

Transformada de Wigner-Ville

$$WV(t,f) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t+\tau/2)S^*(t-\tau/2)e^{-j2\pi f\tau}d\tau \quad (3.9)$$

En las Figs.4.10 y 4.11, se observa el resultado de la aplicación de la transformada de Wigner-Ville, para el procesamiento de distintos tipos de reflectores estudiados.

a - Poros (P)

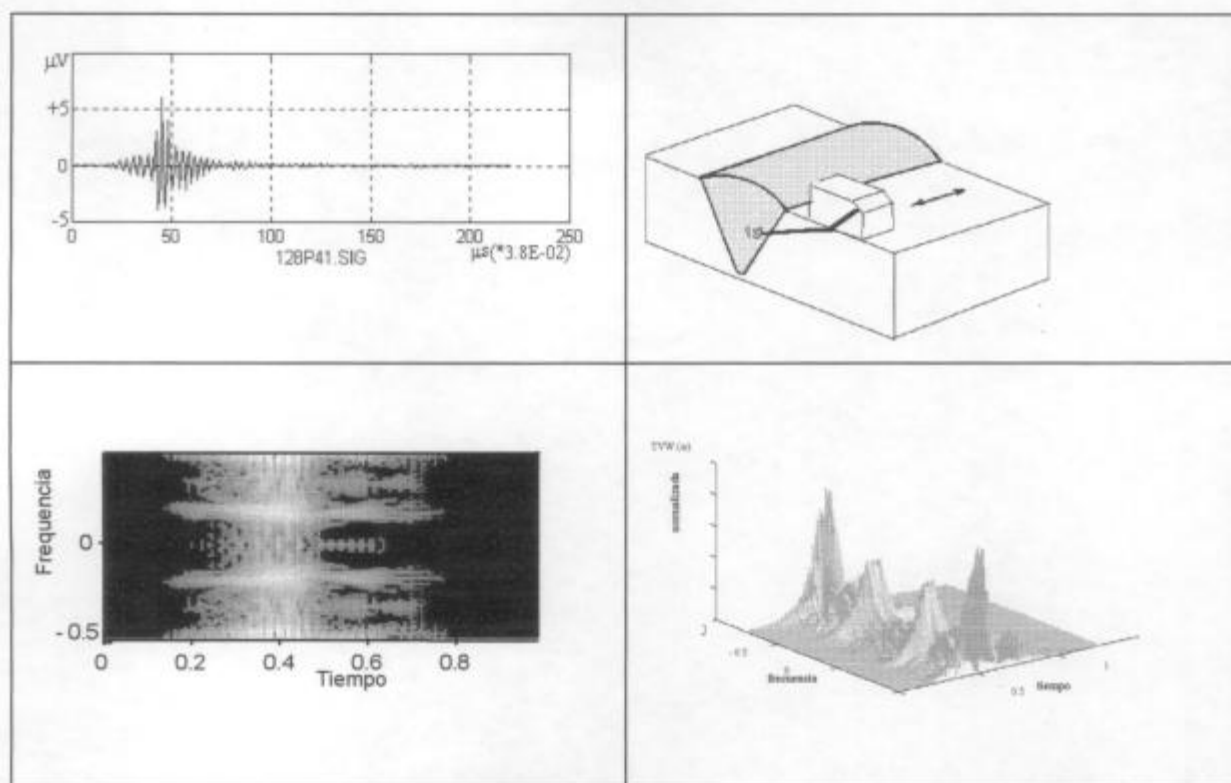


Fig. 4.10 - Procesamiento de señal US RF de poros con WV (f,t)

b - Falta de fusión (LOF) (Fig. 4.11)

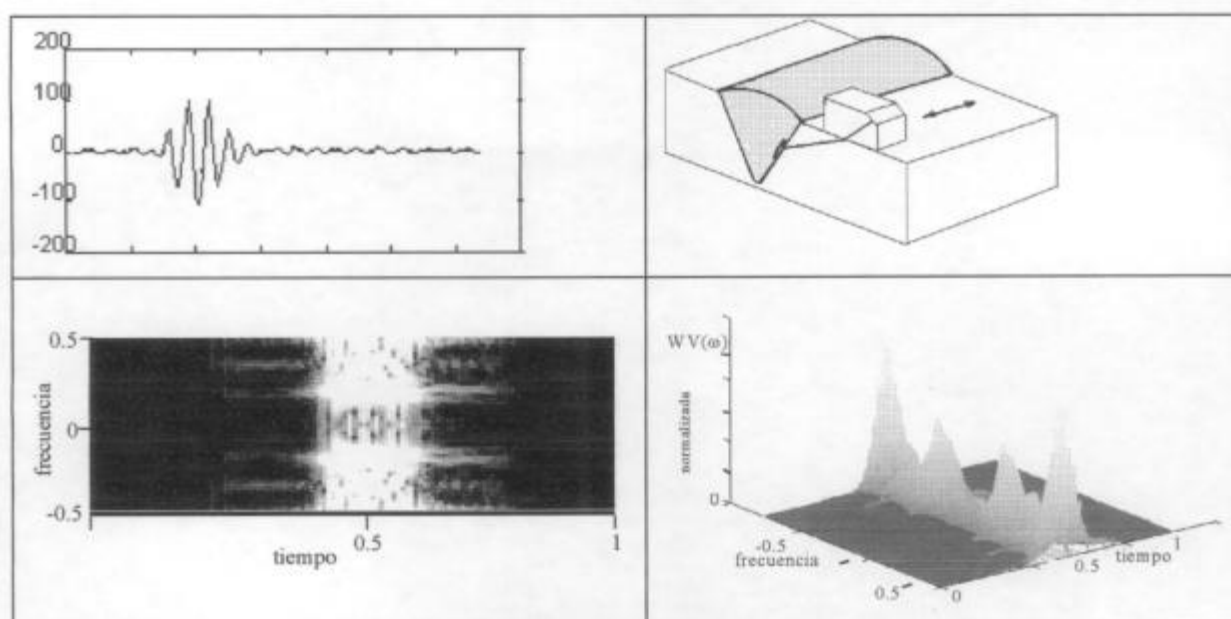


Fig. 4.11 - Procesamiento de señal US RF de LOF con WV (f,t)

5

ANALISIS DE RESULTADOS



5 - ANALISIS DE RESULTADOS

5.1 - Aspectos Generales

El análisis de los resultados obtenidos se realizó sobre la base del objetivo planteado para el desarrollo del presente trabajo, relativo a la construcción de probetas con defectología para la evaluación de los parámetros que afectan la detectabilidad de defectos por ultrasonido (US).

La bibliografía consultada referente a la aplicación del ensayo de ultrasonido para el control de calidad de las uniones soldadas (39), hace referencia a la defectología. Por esta razón en el título del trabajo se utiliza la misma terminología. En este sentido, las normas de control de calidad son más rigurosas, dado que se refieren a reflectores (25). Se considera que lo correcto sería emplear el término discontinuidad (6), con lo cual no se produciría una contradicción entre la bibliografía de carácter tecnológico y las normas. Otro término que se utiliza frecuentemente (incluso en trabajos de investigación), es falla (18). En ninguno de los casos citados se especifica las dimensiones límites de los reflectores. La especificación de dichos límites se realiza por acuerdo entre el usuario y el fabricante, según las condiciones de diseño y requerimientos de servicio.

Los tamaños de reflectores de las probetas construidas son de dimensiones tales que en general pueden ser considerados defectos (son mayores de 3 mm de diámetro). El objetivo fue disponer de reflectores de grandes dimensiones para posibilitar su detección, lo cual es útil para el entrenamiento de personal y procesamiento de la señal ultrasónica. Dada la complejidad de los procesos de soldadura de arco eléctrico utilizados, en las probetas aparecen reflectores imprevistos, de menores dimensiones a los indicados precedentemente. Esto se debe a la incidencia de la aptitud del operador de soldadura. Es probable que se puedan obtener resultados de mayor precisión con la participación de operadores calificados. El costo y disponibilidad de este tipo de operadores es una limitación importante. En la Fundación Latinoamericana de la Soldadura, el costo de una probeta es de alrededor de \$ 250, entregando el material mecanizado. El plazo de entrega está supeditado a los programas de la Fundación.

Durante el desarrollo del trabajo se presentaron las siguientes situaciones:

- Fue necesario construir un conjunto de probetas con discontinuidades en zona de soldadura. Estas probetas se emplearon para la evaluación de las discontinuidades por la técnica de ultrasonido. Para la fabricación de las probetas, fue necesario estudiar los procesos de soldadura que habitualmente se emplean en la industria, en la construcción de componentes destinados a recipientes a presión y estructuras con altas sollicitaciones. Por estas razones se utilizaron aceros con espesores mayores de 20 mm. De las visitas realizadas por los directores de la tesis

a otros centros de investigación y desarrollo surge que la tendencia es el empleo de espesores mayores (40), a escala 1:1, para posibilitar el implante de reflectores y para simular condiciones reales (Fig. 5.1)



Fig. 5.1 – Probetas para ensayo de ultrasonido
En un centro de control de calidad por END en Canadá

- Los procesos de soldadura utilizados (SMAW y GMAW), presentaron un alto grado de complejidad. Se tuvieron que solucionar problemas relacionados con el aprendizaje de los citados procesos de soldadura. Esta es una de las causas por las que no se obtuvieron mejores resultados. La preparación del material para la fabricación de las probetas, también presentó dificultades operativas. Se estudió la composición química y la incidencia del aporte térmico en la transformación de la estructura. Si bien se logró determinar las condiciones en las cuales se forman las estructuras frágiles y la forma de evitar esta situación, resultó compleja la aplicación de los procesos de soldadura.

- Con respecto a la evaluación de la defectología por ultrasonido, fue necesario realizar un entrenamiento en la técnica. Habitualmente los operadores de ultrasonido reciben entrenamientos periódicos y evaluación de aptitud. Para la aplicación del ensayo, se tuvo que suplir la falta de calificación y entrenamiento, por un aprendizaje dirigido, que no alcanzó el nivel de formación de operadores. Al principio se utilizó un equipo analógico. El uso de este equipo presenta dificultades relacionadas con la confortabilidad del operador. En este sentido el factor de mayor incidencia negativa fue el cansancio. La observación de la pantalla del equipo de ultrasonido en forma continua, rápidamente impide la prosecución de la operación.

- Otro aspecto de importancia a tener en cuenta es la implementación del sistema de adquisición y procesamiento de las señales ultrasónicas. El costo del sistema es elevado. El aprendizaje de la operación del sistema resultó complejo. Fue necesario estudiar el procesamiento de señales (41). Por Internet, se logró tomar contacto con Universidad de Michigan (USA), con lo cual se decidió el empleo del Matlab para el procesamiento matemático (42) (43).

Desde esta perspectiva, a continuación se describen los aspectos principales relacionados con el estudio.

5.2.- Materiales (aceros) y Características de Diseño de la Soldadura

Existen aceros con diferente tendencia a presentar defectos en uniones soldadas. También hay diseños de mayor riesgo para las uniones soldadas, que en algunos casos por aparición de discontinuidades, deriva en la propagación de dichas discontinuidades hasta la rotura. Dado que para el estudio se necesitaba disponer de un conjunto de probetas con discontinuidades inducidas, de manera tal que su detección fuese posible, se trató de evitar la formación de defectos originados por el material y por las características de diseño (tipo de junta, material de aporte y geometría del conjunto). Tal como sucede durante la aplicación de la soldadura como proceso industrial, se trabajó con las variables que ocasionan la presencia de defectos característicos del tipo falta de fusión, falta de penetración, porosidad e inclusiones de escoria, según lo descrito en el capítulo 1, punto 1.5.5. Un inconveniente difícil de superar fue la falta de bibliografía para la construcción de este tipo de probetas. Por lo tanto los procedimientos utilizados pueden ser objetables y perfectibles.

El material utilizado debe tener superficies con el menor grado de rugosidad posible para posibilitar el acoplamiento adecuado del palpador y la transmisión del haz ultrasónico. Para el estudio, todas las superficies fueron reacondicionadas por mecanizado y/o amolado. En la práctica, no siempre es posible la preparación de las superficies de control. Las superficies rugosas producen disminuciones de la presión acústica de las ondas por las reflexiones difusas que se generan y provocan dispersión e interferencia del haz ultrasónico, pudiendo transformar su modo de propagación. Para mejorar las condiciones del ensayo, en el caso de superficies con alto grado de rugosidad es conveniente operar con mayores longitudes de onda o con menores frecuencias de ensayo (32). Otra posibilidad es mejorar la sensibilidad del palpador. Para no agregar otra variable en el estudio de la detección de los reflectores, teniendo en cuenta que se logró operar con materiales con valores de atenuación aceptables (en la calibración el eco de fondo al menos alcanzaba el 50 % de altura del eco de emisión), se utilizaron palpadores normales y angulares de 4 MHz. El tema calidad superficial es motivo de discusión y acuerdo entre usuario y fabricante. El factor más importante es el económico, dado que la preparación de las superficies tiene costos elevados, se desarrolla con lentitud y requiere del uso de máquinas especiales (tornos, cepillos, amoladoras angulares, etc.).

Otro aspecto de importancia relacionado con el material y que afecta a la detectabilidad es la atenuación de la presión acústica debido a las características internas de dichos materiales. La atenuación que implica la pérdida de la energía por unidad de distancia, se produce en el haz ultrasónico (por divergencia de la onda) y en el material excitado (por dispersión y absorción). Las heterogeneidades químicas (inclusiones no metálicas, óxidos, etc.) y físicas (porosidad, fisuras, falta de fusión, falta de penetración), la microestructura (tamaño de grano y anisotropía), la presencia de macroestructura (solidificación primaria dendrítica) y de discontinuidades de mayor dimensión que la longitud de onda producen la

dispersión del haz ultrasónico, dado que se comportan como superficies de reflexión, con diferentes impedancias acústicas en el material excitado

Las mediciones realizadas del porcentaje de atenuación en placas de acero forjado SAE 4140, dieron valores elevados. Por lo tanto se aplicó tratamiento térmico de normalizado para afinar el tamaño de grano, con lo que se logró un grado de atenuación aceptable para la aplicación del ensayo de ultrasonido. El tratamiento térmico se realizó en condiciones similares a las que se desarrollan en un taller industrial. Las superficies, luego del tratamiento térmico presentaban oxidación, tal cual se observa en productos de elaboración industrial.

No siempre es posible la aplicación de tratamientos térmicos al material para lograr un nivel de atenuación que no afecte significativamente a la detectabilidad. Las dimensiones de los componentes, la degradación de la superficie resultante del tratamiento, la falta de equipamiento y los costos son los factores que limitan dicha aplicación.

5.3.- Procesos de Soldadura y Reflectores

Las búsquedas realizadas para lograr información referente a las técnicas de inducción de defectos de forma controlada resultó negativa, aunque existe una amplia bibliografía relacionada con la defectología de uniones soldadas que se producen imprevistamente. Las experiencias realizadas permiten concluir que la manera de lograr la inducción de defectos es variada, aunque con resultados dispares. Algunas técnicas para inducir defectos internos se pueden realizar utilizando procesos de corrosión, electroerosión, fatiga, difusión, etc. El inconveniente es que estas técnicas no simulan los procesos de soldadura que se aplican a los grandes componentes. Los ensayos realizados con electroerosión para formar fisuras de 5x5x2 mm no dieron resultado, dado que luego de la aplicación de la soldadura no se logró su detección por ultrasonido (en la superficie de corte de estas probetas se observó fusión completa en la zona de electroerosión). En el caso de tratamientos de difusión con probetas de 50 x 50 mm de superficie, no se observó una unión metalúrgica que posibilitara el paso del haz ultrasónico (44).

El plan de trabajo establecía la obtención de 30 probetas con aproximadamente 100 defectos inducidos. Debido a los inconvenientes que se presentaron en la puesta a punto de las técnicas de inducción de defectos y a la necesidad de desarrollar intensas prácticas de soldadura, se debieron descartar 6 probetas, que presentaban una gran cantidad de discontinuidades imprevistas. Mediante metalografía se detectaron defectos combinados (por ejemplo porosidad y falta de fusión), de difícil caracterización por ultrasonido. De esta forma se pudo establecer que la detección de discontinuidades cuya presencia se conoce previamente, se ve facilitada. En cambio la detección de defectos de origen desconocido resulta compleja y no siempre posible. Para el desarrollo del trabajo únicamente se analizaron las discontinuidades inducidas, a fin de obtener una información que posibilitase el desarrollo de inteligencia artificial, el entrenamiento de personal y el aprendizaje de los problemas que se originan en el campo de la construcción de componentes industriales.

En el caso del proceso SMAW, los factores críticos fueron la velocidad de avance del electrodo y la longitud del arco. Para los espesores utilizados (20 a 30 mm), operando con altas velocidades (>12 mm/s), se producen defectos de falta de fusión y con bajas velocidades (<5 mm/s), se observa quemado del extremo del bisel en zona de raíz. En ambos procesos (GMAW y SMAW), se presentaron problemas relacionados con los parámetros de soldadura (energía aportada, tensión eléctrica, intensidad de la corriente de soldadura, longitud del arco, protección del arco, cantidad de masa aportada, etc.).

Algunos defectos como ser I y LOF, se inducen de manera mas precisa con el proceso SMAW. El proceso automático GMAW presenta mejores posibilidades para inducir defectos de tipo LOP y P. En la Tabla 5.1 se indican los resultados obtenidos.

Tipo de defecto	Proceso SMAW		Proceso GMAW	
	Cantidad	%	Cantidad	%
LOF	32	43	2	3
LOP	2	3	16	22
P	4	5	9	12
I	9	12	-	-
Total	47	63	27	37

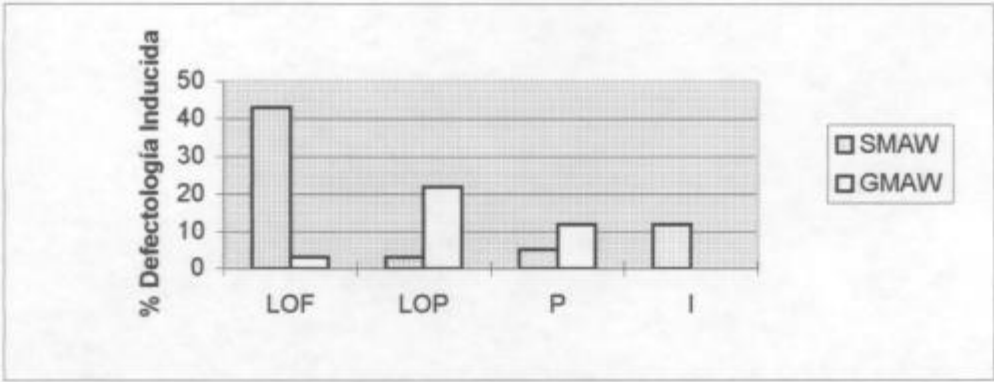


Tabla 5.1 - Defectología inducida por soldadura

En anexo IV se observan las radiografías de reflectores característicos inducidos por aplicación de los procesos de soldadura SMAW y GMAW. En principio las dimensiones determinadas por medición en dichas placas radiograficas presentan diferencia de hasta 10 %. Es posible que esto se debe al posicionamiento del palpador que se realiza con un variación de ± 0.5 mm

5.4.- Técnica y Operadores de Ultrasonido

Considerando la importancia fundamental del rol de los operadores de ultrasonido para la detección de la defectología, se analizaron los siguientes aspectos críticos:

Para lograr un alto grado de eficacia para la detección de defectos, el operador debe tener un entrenamiento intenso y permanente. En la actualidad, debido al avance de la tecnología, la detectabilidad depende en un 80 % de la aptitud del operador y en un 20 % de la calidad de los instrumentos. Por esta razón es que se exige el entrenamiento riguroso de los operadores en todos los niveles. Por otra parte, la tecnología continua avanzando, logrando importantes mejoras en los equipos e instrumental, con lo que la disminuye paulatinamente su incidencia en la detectabilidad. Por este motivo es necesario intensificar el entrenamiento de los operadores.

El tiempo de trabajo que puede soportar el operador también es limitado. Con el transcurso del tiempo, la capacidad de análisis disminuye rápidamente con lo que baja la detectabilidad. Esto tiene relación con la capacidad de decodificación de la información del operador que es limitada y con las dificultades para almacenar la gran cantidad y calidad de la información.

El medio ambiente tiene gran influencia en la actividad del operador. En general los lugares donde debe trabajar, rápidamente agotan su capacidad de análisis. Por ejemplo en la inspección de productos semielaborados en línea de producción de barras laminadas en caliente, se debe operar con alto nivel de ruido y altas temperatura. En estudios recientes en Estados Unidos, se están probando transductores ultrasónicos de contacto para detectar fallas a 200 °C en procesos de soldadura automáticos (45). Esto significa que se debe tratar de adaptar el equipamiento y las condiciones operativas para asistir eficazmente a la producción, lo que atenta contra un entorno soportable y de comodidad para los operadores.

La técnica de ultrasonido empleada (pulso-eco), presenta un alto grado de eficacia para la detección de reflectores en uniones soldadas.

5.5.- Equipos y Transductores para Ultrasonido

Los equipos digitales de reciente aparición masiva en el mercado, brindan mejores posibilidades para la detección de las discontinuidades en los materiales. Por ejemplo el equipo Krautkramer US D 15 S utilizado, una vez calibrado, permite determinar mediante lectura de valores numéricos datos de ganancia (dB), camino sónico del haz reflejado (mm), profundidad del reflector (mm). En cambio operando con equipos analógicos, estos parámetros se deben determinar por observación de la señal, comparando con la graduación de la pantalla y mediante cálculo. La diferencia promedio detectada entre los valores observados en un equipo analógico y la lectura directa en un equipo digital, es de aproximadamente un 10 %. Por otra parte la observación de las señales en la pantalla de un equipo digital produce menor agotamiento visual, dado que la operación se reduce a una lectura numérica.

Para los transductores, además de las mejoras conocidas para lograr mayor detectabilidad (palpadores con gran poder de resolución o con alta sensibilidad), la tecnología brinda otras posibilidades. Muy recientemente se desarrollaron transductores con materiales compuestos (18), con lo cual se posibilitaría la eliminación los modos de reflexión del haz ultrasónico por condiciones geométricas, de manera de obtener únicamente ecos producidos por los reflectores internos inducidos. Se estima que con estas herramientas se mejorará la velocidad y eficacia de la detectabilidad.

Si bien en el campo de la fabricación de equipos e instrumentos para control de ultrasonido se observan avances importantes, se debe tener en cuenta que su costo es elevado.

5.6.- Sistemas de inteligencia artificial

La gran capacidad de procesamiento de la información a través de computadoras y sistemas electrónicos de digitalización (plaquetas digitalizadoras por ej. de 50 MSPS o mayores), define una marcada tendencia a la mejora del control automático aplicado a líneas de producción. El control automático en la actualidad opera con un criterio "pasa" "no pasa" (técnica de gates o umbral), basado en las dimensiones de los reflectores. Esta manera de controlar discontinuidades "on line", presenta el inconveniente de que no clasifica los reflectores por su severidad o forma. De esta manera se produce el rechazo de productos con discontinuidades aceptables y no aceptables desde el punto de vista de la fractomecánica, del diseño y de las condiciones de servicio. Esta situación constituye una desventaja de carácter económico, dado que ocasiona el rechazo de piezas aptas. Para las velocidades de producción de las plantas fabriles actuales, que tienden a ser cada vez más elevadas, una posible solución es el desarrollo de sistemas de inteligencia artificial por redes neuronales.

Sobre la base de lo expuesto, uno de los objetivos del presente trabajo fue estudiar las posibilidades de mejora en la detectabilidad de la defectología en uniones soldadas. Como consecuencia de lo observado en visitas realizadas por los directores de la tesis a centros de investigación de Inglaterra, Estados Unidos y Canadá (40), se preparó un programa de trabajo para ser desarrollado por personal del laboratorio de ultrasonido, a partir de la presente tesis. Las partes principales de dicho programa son las siguientes:

Evaluación de las discontinuidades inducidas por operadores calificados – Contraste de la información por otros ensayos no destructivos – Observación de las señales ultrasónicas de las discontinuidades en el equipo digital, en modo RF - Digitalización de la señal con plaqueta GAGESCOPE y almacenamiento de la información en archivos binarios - Procesamiento de los archivos con Matlab en PC (con transformadas tiempo-frecuencia de Winner-Ville) - Aplicación de algoritmos con Toolkit de Matlab para entrenamiento de la PC en redes neuronales artificiales (RNA).

Estas potentes herramientas sin duda pueden mejorar la detectabilidad, teniendo como objetivo su aplicación a líneas de producción. De acuerdo a lo analizado en la bibliografía (46), las principales características de los sistemas de IA por RNA son:

- Aprendizaje adaptativo: Capacidad de aprender a ejecutar tareas basadas en entrenamiento inicial

- Autoorganización: LRN puede crear su propia organización de la información que recibe en la etapa de aprendizaje.

- Tolerancia a fallos. La destrucción parcial de una red conduce a una degradación de su estructura. Algunas capacidades de la RNA se logran retener, aún cuando sufre un gran daño.

- Posibilidad de operación con el mismo grado de eficacia sin limitaciones de tiempo (no se presenta en problema del agotamiento)

- Capacidad de reconocimiento de discontinuidades bajo ruido (por ejemplo materiales con alto grado de atenuación de las ondas ultrasónicas)

- Operación en tiempo real. Las computadoras para RNA operan en paralelo y por lo tanto el hardware debe ser fabricado para lograr esta capacidad

- Facilidad de inserción en la tecnología existente. Se pueden obtener chips especializados para RNA con lo que mejora su capacidad para ciertas tareas. Esto posibilita su integración modular en sistemas existentes.

El objetivo del trabajo no incluía el desarrollo de RNA o sistemas de inteligencia artificial (IA), sino solamente la obtención de información que sirviese de base de datos para el entrenamiento de RNA, lo que se logró aceptablemente. Las tareas de desarrollo de RNA se realizaron para comprobar el funcionamiento del sistema. Para analizar el grado de aprendizaje de la RNA, en una primer etapa se utilizaron letras del alfabeto (A, B, C). Luego de un período corto de entrenamiento la RNA distinguía estas letras. Posteriormente se degradaba la figura de las letras colocando caracteres al azar y luego de un determinado entrenamiento (aplicación repetida del algoritmo), también reconocía las letras. De la misma manera que procede el ser humano, la RNA aprende en base a entrenamiento

6

CONCLUSIONES



6 - CONCLUSIONES

La fabricación de componentes para uso a gran escala industrial incluye la aplicación de procesos de soldadura de arco eléctrico, dado que se trata de aceros con grandes espesores. En consecuencia la detección de discontinuidades en uniones soldadas es de suma importancia, considerando que estas afectan a la durabilidad e integridad de dichos componentes, con los consiguientes perjuicios económicos y problemas relacionados con la seguridad y el medio ambiente. Desde esta perspectiva, las conclusiones que surgen del análisis del trabajo desarrollado son las siguientes:

1 – Los procesos de soldadura SMAW y GMAW empleados para la construcción de las probetas son similares a los procesos de fabricación de componentes industriales. Dados los resultados positivos obtenidos esto constituye una ventaja importante frente a otros procesos de soldadura (por ej. soldadura por difusión, por resistencia eléctrica, por fricción, etc.)

2 – Los espesores de las probetas (20 a 30 mm), limitan la posibilidad de implantar reflectores, dado que la energía aportada por el arco eléctrico produce una importante variación de las dimensiones de dichos implantes. Por esta razón es conveniente utilizar materiales con mayores espesores, en lo posible a escala real (1 : 1)

3 – Las calidades de los materiales empleados (excepto la de SAE 1010 por su baja resistencia mecánica y alta ductilidad), son adecuadas para el estudio dado que presentan las características de los aceros destinados a componentes industriales con altas solicitaciones de presión y temperatura.

4 – El estudio de la interacción del haz ultrasónico con el material presenta aspectos relevantes que permiten comprender los fenómenos físicos que se producen en dicha interacción. De esta forma se pueden seleccionar las condiciones de trabajo que posibiliten la obtención de resultados válidos, una mejor comprensión de la información obtenida y una correcta aplicación de las técnicas y equipos.

5 – La información de mayor precisión que se logra mediante la aplicación del ensayo de ultrasonido es la ubicación del reflector. En segunda instancia se logra una clasificación de la forma de los reflectores (plana, volumétrica, agrupada, etc.). Los datos referidos a las dimensiones de los reflectores son los que presentan la menor precisión y mayores inconvenientes. Las dimensiones de los reflectores observadas en las placas radiográficas corroboran esta situación.

6 – Es posible encontrar operadores con mayor o menor aptitud para la aplicación eficaz del ultrasonido. También se puede mejorar el grado de

conocimiento teórico. Lo que no se puede variar es la capacidad de análisis relativa a la cantidad de información. Es aquí donde prevalece el desarrollo de inteligencia artificial con el que se pueden lograr resultados significativos capaces de clasificar ciertas poblaciones (por ej. diferentes tipos de defectos en uniones soldadas), durante tiempos ilimitados, sin variar el grado de rendimiento y eficacia.

Perspectivas

El trabajo realizado constituye una primer parte de un programa de investigación y desarrollo proyectado por el laboratorio de ultrasonido del Instituto de Ensayos No Destructivos dependiente de la Unidad de Ensayos No Destructivos y Estructurales del Centro Atómico Constituyentes de la CNEA. La medición de los reflectores por diferentes operadores y por otras técnicas de ensayos no destructivos y destructivos, permitirá realizar las correcciones pertinentes, de manera de continuar con el estudio de inteligencia artificial por RNA. Globalmente, el proyecto es de carácter tecnológico y por lo tanto existen posibilidades concretas para su aplicación en la industria.

7

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

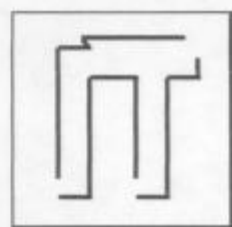


- 1.- Hudson Robert S.; Developing a Nondestructive Testing Program for Homopolar Welding of Line Pipe, Review NDT Net, -Texas, USA, 1997.
- 2.- Kuhn, T.S., La Estructura de las Revoluciones Científicas, México, FCE, 1971.
- 3.- Principles of Joining Metallurgy, Welding and Brazing Handbook, 9th. Ed., Vol. 6, Chapt. 2, ASM, Ohio, 1983.
- 4.- Physics of welding; Welding Handbook, Vol. 1, Chapt. 2, AWS, Florida, USA, 1976
- 5.- De Vedia Luis; Tendencias Actuales en las Soldaduras de Tuberías, Boletín Conarco nº 88, 1988
- 6.- Weld Discontinuities, Welding Handbook, Vol. 1, Chapt. 5, AWS, Florida, USA, 1976.
- 7.- INTA: Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial; Introducción a los Métodos de Ensayos No Destructivos, 3er. Edición, Madrid, 1980.
- 8.- S.K. Niyogi, A.C. Das; Prediction of Thermal Shock Behaviour of Castable Refractories by Sonic Measurements, Interceram, Vol. 43, Nº 6, 1994.
- 9.- Structural Welding Code; ANSI/AWS D 1.1 – 96, AWS, Miami, USA, 1996
- 10.- Boiler and Pressure Vessel Code; Nondestructive Examination, ASME V, NY, USA, 1986.
- 11.- Standar Guide for Data Fields for Computerized Transfer of Digital Ultrasonic Testing Data; ASTM E 1454-92, ASTM Standar Section 3, V 03.03
- 12.- ASTM A 388-80, Ultrasonic Examination of Heavy Steel Forgings.
- 13.- SA-435-80, Standar Specification for Straight-Beam Ultrasonic Examination of Steel Plates, Código ASME V, 1986
- 14.- ASTM E 164-94a, Estándar Practice for Ultrasonic Contact Examination of Weldments.
- 15.- J. Blitz, G. Simpson; Ultrasonic Methods of Non-destructive Testing, The Propagation of Low Amplitud Ultrasound; Chapman & Hall, Cambridge, UK, 1996
- 16.- Antonio G.Arias y Carlos E. G. Arias; Control de Materiales mediante Ondas Ultrasónicas, Ultrasonido, Ed. Litenia, Bs. As., 1987

- 17.- J. Krautkramer, H. Krautkramer; The Pulse-Echo Method, Ultrasonic Testing of Materials, 4th. Ed., Cap. 8, Springer-Verlag, Gernmay, 1990.
- 18.- Feole Robert A.; Flaw Analysis and Sizing Technique, Jornadas de END de Materiales, Bs. As., Argentina, 1997.
- 19.- Antonio G.Arias y Carlos E. G. Arias; Control de Materiales mediante Ondas Ultrasónicas, Ultrasonido, p.16, Ed. Litenia, Bs. As., 1987
- 20.- J. Krautkramer, H. Krautkramer; The Pulse-Echo Method, Ultrasonic Testing of Materials, 4th. Ed., Cap. 4, Springer-Verlag, Gernmay, 1990.
- 21.- Antonio G.Arias y Carlos E. G. Arias; Control de Materiales mediante Ondas Ultrasónicas, Ultrasonido, p.34, Ed. Litenia, Bs. As., 1987
- 22.- E. Borloo, P. Jehenson; Characterization of Ultrasonic Transducers, Commision of the European Communities Joint Research Centre, 1980
- 23.- Antonio G.Arias y Carlos E. G. Arias; Control de Materiales mediante Ondas Ultrasónicas, Ultrasonido, p.35, Ed. Litenia, Bs. As., 1987
- 24.- Antonio G.Arias y Carlos E. G. Arias; Control de Materiales mediante Ondas Ultrasónicas, Ultrasonido, p.11, Ed. Litenia, Bs. As., 1987
- 25.- Standards ASTM; Vol. 03.03, Nondestructive Testing, 1996.
- 26.- J. Krautkramer, H. Krautkramer; The Pulse-echo Method, Ultrasonic Testing of Materials, 4th. Ed., Cap. 10, Springer-Verlag, Gernmay, 1990.
- 27.- Antonio G.Arias y Carlos E. G. Arias; Control de Materiales mediante Ondas Ultrasónicas, Ultrasonido, p.12, Ed. Litenia, Bs. As., 1987.
- 28.- A.R. Baker and C.G. Windsor, The Hopfield Method, NDT International, Vol. 22, N° 2, 1989
- 29.- Introducción a la Técnica Alemana de Ensayos no Destructivos, Krautkramer GmbH, Alemania.
- 30.- P. Saavedra *et al*, Diagnóstico de Fallas en Máquinas Rotatorias usando Distribuciones Tiempo-Frecuencia, CORENDE, Mendoza, Argentina, 1997
- 31.- Antonio G.Arias y Carlos E. G. Arias; Equipo Ultrasónico de Pulso-Eco, Ultrasonido, p. 79, Ed. Litenia, Bs. As., 1987
- 32.- Technical Reference and Operating Manual USD 15, Krautkramer, Alemania.
- 33.- Manual de Operación de Equipo RG 21, Gilardoni, Italia
- 34.- Sonograma Krautkramer, Alemania

- 35.- Joint Design and Preparation; Metals Handbook Welding and Brazing, Vol. 6, ASM. Ohio, USA, 1986
- 36.- Shielded Metal Arc Welding Gas Metal Arc Welding; Metals Handbook Welding and Brazing, Vol. 6, ASM. Ohio, USA, 1986
- 37.- Giacchetta Roberto, Segmentación de Señales Ultrasónicas Utilizando RNA, Jornadas AFA, San Luis, Argentina, 1997.
- 38.- Gary G. Leisk and Anil Saigal; Digital Computer Algorithms to Calculate Ultrasonic Wave Speed, Materials Evaluation, 1996
- 39.- J. Krautkramer, H. Krautkramer; The Pulse-Echo Method, Ultrasonic Testing of Materials, 4th. Ed., Cap. 28, Springer-Verlag, Germany, 1990.
- 40.- P. Katchadjian, Comisión de Servicio realizada a Canadá, CAC-CNEA, 1994
- 41.- A. Oktay, Digital Signal Processing, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, USA, 1994
- 42.- Tutorial Matlab, Mechanical Engineering, Michigan University, USA, 1997
- 43.- Eva Part-Enander, The Matlab Handbook, Addison Wesley, USA, 1996
- 44.- O. Marengo, Aplicación de Soldadura por Difusión para Construcción de Probetas con Defectología Inducida, INEND, CAC-CNEA, 1997
- 45.- Shaun Lawson, Ultrasonic Testing and Image Processing for In-progress Weld Inspection, University of Surrey, UK, 1996
- 46.- Bart Kosko, Neural Network for Signal Processing, Prentice Hall, USA, 1996

ANEXOS



Anexo I - Constantes y Ecuaciones de la Física y Metalurgia de la Soldadura

$k = 0.028 \text{ (J/ mm.s.}^{\circ}\text{C)}$ Conductividad térmica del acero al carbono

$\rho C = 0.0044 \text{ (J / mm}^3 \cdot ^{\circ}\text{C)}$ Calor específico del acero

ρ : Densidad (g/ mm³)

$K = k/\rho C \text{ (cm}^2\text{/s)}$ (difusividad térmica)

T_{pic} : Máxima temperatura a una distancia x de la línea de fusión ($^{\circ}\text{C}$)

T_o : Temperatura inicial del material a soldar ($^{\circ}\text{C}$)

T_m : Temperatura de fusión (Líquidus) ($^{\circ}\text{C}$)

C : Calor específico del metal (J/g. $^{\circ}\text{C}$)

h : Espesor del material a soldar (mm)

v : Velocidad de avance del electrodo (mm/s)

τ : Espesor relativo (adimensional)

l : longitud del cordón

H_f : Calor de fusión (J/kg)

L : Cantidad específica teórica de calor necesaria para fundir un cierto volumen de metal desde temperatura ambiente (J/mm³)

T_c : Temperatura de referencia a la cual se determina R

T_{prec} : Temperatura de precalentamiento (Sin precalentamiento $T_{prec} = T_o$)

S_t : Tiempo de solidificación (s)

R : Velocidad de enfriamiento ($^{\circ}\text{C/s}$)

t : tiempo (s)

INSTITUTO DE TECNOLOGIA "Prof. Jorge A. Sabato" UNSAM - CNEA

Anexo II – Análisis Químico por Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X, sobre muestras tomadas del material destinado a la construcción de las probetas (check análisis)

a*- Acero calidad SAE 1010

Composición química (%): C 0.13 – Mn 0.6 – Si 0.3 – P 0.023 – S 0.032

b** - Acero calidad SAE 1045

Composición química (%): C 0.47 – Mn 0.66 – Si 0.25 – P 0.019 – S 0.027 – Cr. 0.078 – V 0.01 – Al 0.023

c** – Acero calidad SAE 4140

Composición química (%): C 0.42 – Mn 0.82 – Si 0.32 – P 0.035 – S 0.035 – Cr. 0.92 – Mo 0.19 – Al 0.032

d** – Acero calidad C-75

Composición química (%): C 0.37 – Mn 1.45 – Si 0.37 – P 0.026 – S 0.035

e** – Calidad SAE 1536 –

Composición química (%): C 0.31 – Mn 1.37 – Si 0.29 – P 0.022 – S 0.025

* Laboratorio de Control Químico de la Unidad de Actividad Combustibles Nucleares del Centro Atómico Constituyentes de la CNEA

** Laboratorio de SIDERCA SAIC

Tolerancia de análisis:

% C: ± 0.02

% Mn: ± 0.03

% Si: ± 0.02

% P: ± 0.003

% S: ± 0.003

% Cr: ± 0.02

% Mo ± 0.02

% Al: ± 0.003

Anexo III - Programa de MATLAB para Tratamiento Matemático de Archivos *.sig, de
Señales Ultrasónicas Digitalizadas

```
clear
z=1
while z==1

newmatfile='pp'
newpath='c:\'

[newmatfile, newpath] = uigetfile('*.sig', 'graba') ;

fid=fopen(newmatfile,'r')
F=fread(fid,5000,'char');
fclose(fid)


longitud=500
incremento=1000

subplot(2,1,1),plot(F)
xlabel(newmatfile)
plot(F)
[x1,yi,but] = ginput(1);
[x2,yi,but] = ginput(1);


longitud=x2-x1;

data=1:longitud;

for t=1:longitud,
data(t)=(F(x1+t)-128);
end;

G=fft(data);
grid on


FF=1:fix(longitud/2);

for i=1:fix(longitud/2)
FF(i)=abs(G(i));
end;
```

```

axis([x1,x2,-200,200])
subplot(2,1,1),plot(data)
grid
xlabel(newmatfile)

if longitud < 300

    x = 1:fix(longitud/2);
    xi = 1:0.1:fix(longitud/2);
    yi = spline(x,FF,xi);
    grid on

    subplot(2,1,2),plot(xi,yi)
    [x1,y1,but] = ginput(1);
    [x2,y2,but] = ginput(1);
    axis([x1 x2 y1 y2])
    grid

else

    subplot(2,1,2),plot(FF)
    [x1,y1,but] = ginput(1);
    [x2,y2,but] = ginput(1);
    axis([x1 x2 y1 y2])
    grid
    [x2,yi,but] = ginput(1);
    frecu=x2*25000000/longitud

    [x2,yi,but] = ginput(1);
    frecu=x2*25000000/longitud

    [x2,yi,but] = ginput(1);
    frecu=x2*25000000/longitud

end

pause
end;

```

Anexo IV – Radiografías de Reflectores Característicos

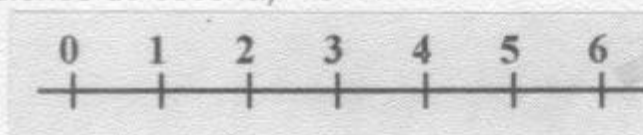
Probeta n° 104

Medidas en mm (± 1 mm)

1 – LOF (falta de fusión) - 9 x 5 mm

2 – LOP (falta de penetración) - 3 x 10 mm

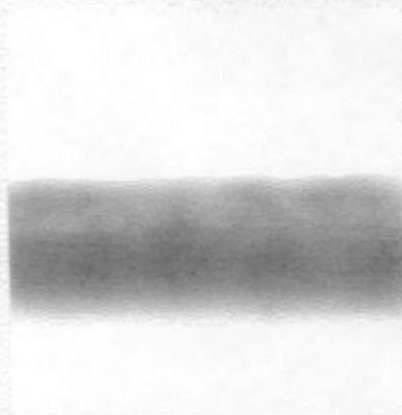
3 – I (inclusiones de escoria) - 5 x 7 mm



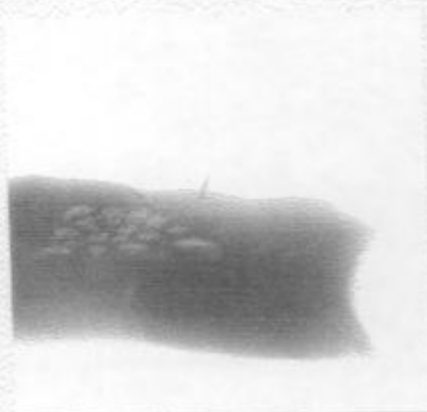
104



1



2



3

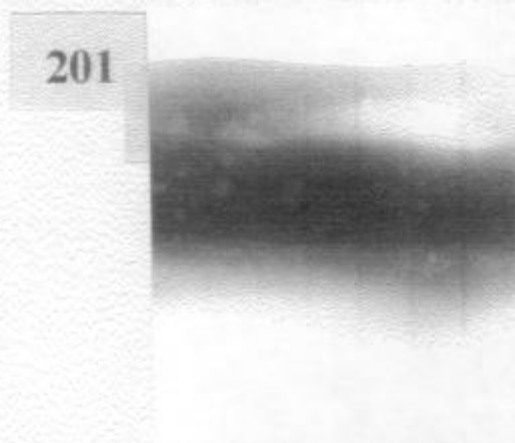
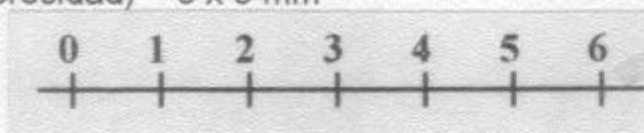
Anexo IV – Radiografías de Reflectores Característicos

Probeta nº 201

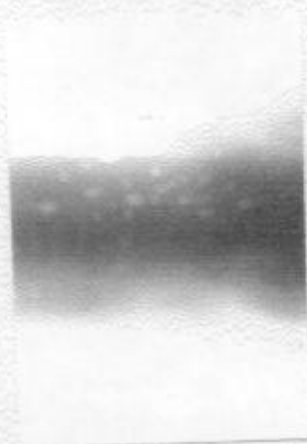
Medidas en mm (± 1 mm)

1 – LOF (falta de fusión) - 10 x 5 mm

2 – P (porosidad) - 5 x 8 mm



1



2

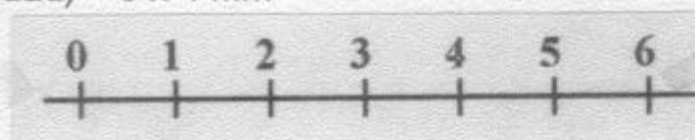
Anexo IV – Radiografías de Reflectores Característicos

Probeta n° 302

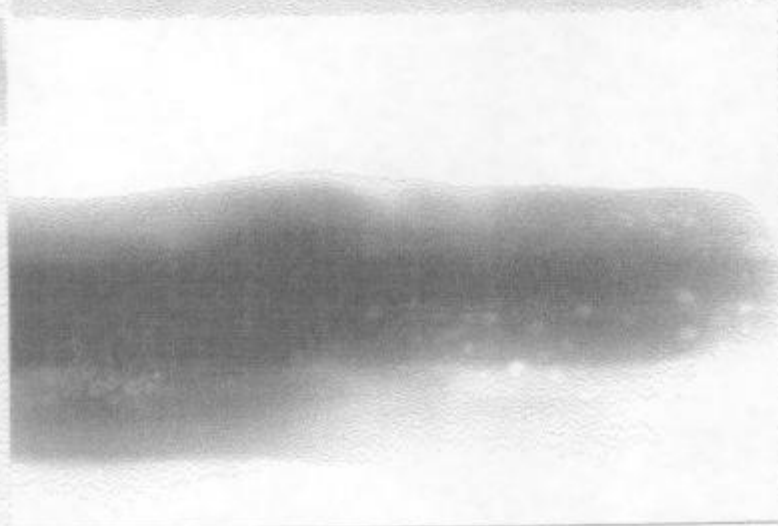
Medidas en mm (± 1 mm)

1 – LOP (falta de penetración) – 8 x 90 mm

2 – P (porosidad) – 5 x 4 mm



302



Anexo IV – Radiografías de Reflectores Característicos

Probeta nº 304

Medidas en mm (± 1 mm)

1 – LOF (falta de fusión) - 90 x 7 mm

2 – P (porosidad) - 7 x 7 mm

