

María Larráyoiz Izcara

Caracterización de uniones soldadas GMAW a
solape en chapas finas de acero
DX53D + Z100MB mediante ultrasonidos

Trabajo Fin de Máster

upna
Universidad
Pública de Navarra
Nafarroako
Unibertsitate Publikoa



Caracterización de uniones soldadas GMAW a solape en chapas finas de acero DX53D + Z100MB mediante ultrasonidos

Trabajo aprobado y presentado
ante la Comisión de Máster de la
Universidad Pública de Navarra
para la obtención del grado académico de
Máster en Ingeniería de Materiales y Fabricación

realizado por
María Larráyoiz Izcara
de
Pamplona, España

Septiembre 2014

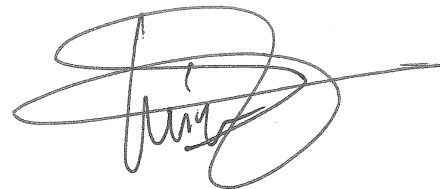
Agradecimientos

En primer lugar quisiera agradecer al equipo de Chapistería de Volkswagen Navarra S.A. la oportunidad brindada para el curso de esta investigación, muy especialmente al Laboratorio de ensayos de uniones y Cabina destructiva y a Paco Gómez Pedrosa, Fermín García Huarte y Seve Goya Etxeberria.

A mi tutor de la universidad Rafael Rodríguez Trías, por el tiempo dedicado a este estudio y por sus sabias recomendaciones.

Y como no, a mi familia.

Asimismo, a todas aquellas personas que, habiendo colaborado de un modo u otro, por omisión involuntaria no han sido reflejadas en estas líneas.



María Larráyoz Izcará

Resumen

En el sector de la automoción, una de las técnicas de unión para la construcción de carrocerías basadas en acero más extendida es la soldadura, tanto por resistencia como por arco eléctrico protegido (GMAW, por sus siglas en inglés). Uno de los aspectos más importantes para el control de las soldaduras es la detección de la falta de fusión y/o penetración y la estimación de la profundidad de penetración así como la anchura de la zona fusionada. De forma general, la inspección destructiva de las uniones, y más concretamente, el corte transversal de las mismas para su posterior análisis al microscopio, se viene desarrollando sistemáticamente en la industria con el objeto de examinar la estructura metalúrgica de las soldaduras. Este método, en cambio, posee ciertas desventajas como son su alto coste, consumo elevado de tiempo, falta de rapidez en la reacción ante la detección de anomalías y derroche de material. Por ello, la inspección por métodos no destructivos -NDT, Non-Destructive-Testing, por sus siglas en inglés- se presenta como una firme alternativa para sustituir a los ensayos destructivos.

Existen varias técnicas de inspección no destructiva destacando la inspección visual, la radiografía, las corrientes inducidas (Eddy current), los líquidos penetrantes, las partículas magnéticas y los ultrasonidos. Algunos de estos métodos tienen como función principal la inspección superficial, esto es, detectar y evaluar las discontinuidades abiertas y cercanas a las superficies de los materiales a ensayar, entre los que se encuentran la inspección visual, los líquidos penetrantes, las partículas magnéticas y las corrientes inducidas. En cambio, otras técnicas como son la radiografía y los ultrasonidos tienen por objeto la inspección volumétrica en cuanto a verificar la homogeneidad interna del material y comprobar el grado de integridad a lo largo de todo su espesor. Por tanto, estas últimas son las técnicas más indicadas para la inspección de uniones soldadas.

No obstante, a pesar de que existen varios métodos NDT para detectar fallos o imperfecciones en las soldaduras, no todos pueden ser empleados para la observación o determinación de la estructura metalúrgica. En este sentido, el análisis ultrasónico se distingue por la posibilidad de obtener información de la microestructura y del tamaño de grano en comparación con otros métodos no destructivos. En el caso de los materiales metálicos, la estructura cristalina de éstos provoca una gran dispersión de la onda ultrasónica. Mayor dispersión cuanto más elevada sea la frecuencia. El tamaño de grano de dichos cristales se puede determinar a partir de la energía

dispersada, puesto que existe una relación directa entre ambas magnitudes.

Los ultrasonidos se vienen empleando durante los últimos años de forma relativamente extendida en el sector de la automoción. Su uso se ha limitado a la inspección de puntos de soldadura por resistencia en la carrocería. Sin embargo, su aplicación en uniones soldadas GMAW no ha sido analizada en profundidad. De ahí la necesidad de este trabajo.

En el presente estudio, se va a desarrollar un método mediante ultrasonidos para observar la estructura y la constitución de las soldaduras GMAW en unión de tipo solape de chapas finas de espesor 1.9 mm de acero al carbono de baja aleación galvanizado en caliente DX53D + Z100MB. Los resultados obtenidos se compararán a través de un análisis metalográfico usando microscopía óptica de las muestras utilizadas con el fin de corroborar la precisión y/o la exactitud de la técnica ultrasónica propuesta.

La preparación de las muestras se realiza en automático con la ayuda de un robot. Los patrones elaborados recogen las siguientes condiciones: soldadura óptima; soldadura con penetración escasa; soldadura con exceso de penetración o recrecido de cordón; y soldadura con coalescencia de poros. El modo de inspección ultrasónica empleado es el de pulso-eco con un transductor único de haz longitudinal, frecuencia 20 MHz, filtro de banda ancha de 7-20 MHz, con un retardo de metacrilato de 4 mm de longitud para evitar el campo cercano del palpador y contacto directo sobre el cordón de soldadura, con gel "AquaUltra Clear" como medio de acoplamiento. El aparato de generación y medición ultrasónica empleado es "SpotChecker" de General Electrics Sensing & Inspection Technologies, con la amplitud y el tiempo de vuelo de la señal ultrasónica medidos y analizados. Los datos se visualizan de acuerdo con la representación tipo A. Previamente a la realización de los experimentos, el sistema será calibrado de acuerdo a las normas preestablecidas para transductores longitudinales.

El elemento innovador de este trabajo es: i) la aplicación ingenieril del método no destructivo de ultrasonidos a uniones soldadas GMAW; ii) en chapas de pequeño espesor, ya que la mayor parte del trabajo llevado a cabo hasta el momento se ha realizado para láminas de espesor superior a 6 mm; iii) considerando uniones a solape y no a tope, donde por la propia naturaleza de la geometría de la unión, la secuencia o trayectoria de propagación del ultrasonido difiere sustancialmente; iv) y realizando la inspección ultrasónica mediante el posicionamiento del transductor directamente sobre el cordón de soldadura en modo longitudinal, dados los problemas de accesibilidad que se dan con gran frecuencia en la mayor parte de las aplicaciones industriales.

Abstract

Welding is an essential process in almost all industries. In fact, in the automotive sector, one of the most widely used joining techniques for body construction based on steel is welding, both resistance spot welding and gas metal arc welding (GMAW). One of the most important items of the control in welds is to detect lack of penetration and/or fusion and to estimate penetration depth and width. In practice, sampling destructive inspection, namely cutting some specimens for metallographic inspection, has been carried out to observe cross sectional configuration of metallurgical structure of welds and consequently to monitor its quality. This method, however, has some disadvantages. It is not only time-consuming, but also destructive and wasteful, and automated inspection using cutcheck is not possible. Therefore, non-destructive testing (NDT) methods are expected to substitute destructive methods.

Current NDT methods for weld inspection include visual, optical, dye-penetrant, magnetic particle, eddy current, radiography and ultrasonic techniques. These methods can be subdivided into two major categories: surface inspection and volumetric inspection. The first of them, as its name indicates, has the main objective to detect and evaluate open discontinuities next to the surface of the piece under inspection. Amongst surface inspection methods are visual, optical, dye-penetrant, magnetic particle and eddy current methods. On the other hand, radiography and ultrasonic testing, the volumetric methods, are used to verify the homogeneity inside the material and to check the level of integrity along its thickness. So they allow detecting typical flaws in welds such as internal cracks, porosity and lack of root fusion.

Although there are several NDT methods to detect flaws in welds, any of them cannot be used for observation of metallurgical structure. In this sense, ultrasonic examination has potential ability to identify metallurgical structure comparing with other NDT methods. During propagation in metallic materials, high frequency ultrasound scatters across its crystalline structure and scattered energy depends on grain size of the crystals. Therefore grain size can be determined.

Within the framework of the quality assurance in the automotive industry, ultrasonic test has achieved a high state of the art during the last years and is applied by almost all car manufacturers. However, its use has been limited to check spot welds. The application of ultrasound to probe

GMAW welds in the body of a car has not been analyzed in depth. Hence the need for this work.

In this study, we will develop an ultrasonic method to observe the structure and constitution of lap welds made by GMAW process of thin sheets 1.9 mm thick of mild steel hot-dip galvanized DX53D + Z100MB. Cutcheck inspection is then performed and the metallographic analysis of the samples through optic microscopy carried out. The ultrasonic results are compared with the cutchek outcomes in order to verify and validate the accuracy of the proposed ultrasonic technique.

The preparation of the samples is performed automatically with the aid of a robot. The elaborate patterns collected the following conditions: optimum weld; weld with lack of penetration; excess weld penetration or overthickness; and porosity (coalescence of pores). The ultrasonic experiments were conducted in the pulse-echo mode. A single 20 MHz normal beam probe with a 4 mm long delay line of Perspex to avoid the near field was employed to generate a longitudinal wave, with gel "AquaUltra Clear" as the sonic couplant. The probe was placed in direct contact onto the weld bead. The ultrasonic generating and measuring equipment used is "SpotChecker" of General Electric Sensing & Inspection Technologies, with a 7-20 MHz bandwidth filter and the echo amplitude height and traveling time (time of flight) of the ultrasonic signal being measured and analyzed. The data is displayed according to the type of representation A (A-Scan). Before carrying out the ultrasonic measurements, the system was calibrated according to the standards for longitudinal transducers.

The innovative aspect of this paper is: i) the engineering application of ultrasonic non-destructive method to GMAW welded joints; ii) on plates of small thickness, since most of the work done so far has been made on sheets of thickness greater than 6 mm; iii) considering lap joints and non-butt welds, where due to the nature of the weld geometry, the ultrasound propagation path differs substantially; iv) and performing the ultrasonic inspection in longitudinal mode by positioning the transducer directly onto the weld bead, because of the accessibility problems that may occur frequently in most industrial applications.

Índice de Contenidos

1	Introducción	1
1.1	Objetivos	12
2	Inspección mediante Ultrasonidos	15
2.1	Historia y Desarrollo	15
2.2	Teoría y Principios fundamentales	19
2.2.1	Naturaleza de las ondas de sonido	19
2.2.2	Vibración del sonido	20
2.2.3	Modos de propagación	22
2.2.4	Propiedades de las ondas ultrasónicas	26
2.2.4.1	Velocidad	26
2.2.4.2	Longitud de onda	29
2.2.4.3	Reflexión	30
2.2.4.4	Medio de acoplamiento	31
2.2.4.5	Refracción	31
2.2.4.6	Conversión de modo de propagación	33
2.2.4.7	Características del haz	37
2.3	Equipo y Accesorios	44
2.3.1	Transductor ultrasónico	48

ÍNDICE DE CONTENIDOS

2.3.1.1	Piezoelectricidad	49
2.3.2	Representación gráfica. Display	50
2.4	Principales Variables	51
2.4.1	Temperatura y Velocidad	52
2.4.2	Atenuación	54
2.4.3	Frecuencia y Tamaño de grano	55
2.4.4	Condiciones superficiales	55
2.4.5	Cambios en el diámetro	55
2.4.6	Presión de contacto y Acoplamiento	55
2.4.7	Estructuras dendríticas	56
2.4.8	Ganancia	56
2.4.9	Otros factores	56
3	Método experimental	57
3.1	Material	57
3.2	Soldadura GMAW de chapas en unión a solape	60
3.3	Ultrasonidos: equipo, calibración y mediciones	61
3.4	Análisis metalográfico: microscopía óptica	66
4	Metodología propuesta	67
4.1	Técnica de pulso-eco	68
4.2	Eco de fondo	68
4.3	Dimensión y geometría de una soldadura en cordón de solapa	71
4.4	Posicionamiento del transductor sobre el cordón	73
4.4.1	Posición A	73
4.4.2	Posición B_0	76

ÍNDICE DE CONTENIDOS

4.4.3	Posición B	77
4.4.4	Posición C	78
5	Resultados y Discusión	81
5.1	Análisis ultrasónico	81
5.2	Análisis metalográfico	86
5.3	Comparación entre análisis ultrasónico y metalográfico. Validación del método propuesto	90
5.3.1	Soldadura óptima	92
5.3.2	Soldadura con recrecido de raíz	96
5.3.3	Soldadura con penetración insuficiente	99
5.3.4	Soldadura con poros internos	100
6	Conclusiones	103
	Bibliografía	107
A	Grupos de valoración y valores límite de irregularidades en uniones soldadas GMAW	111

Lista de Figuras

1.1 Soldadura GMAW	2
1.2 Soldadura a tope y soldadura a solape	10
2.1 Primeros equipos de ultrasonidos	19
2.2 Rangos audible, subsónico y ultrasónico del sonido	20
2.3 Oscilador masa-muelle y ciclo de oscilación	21
2.4 Propagación de una onda en un medio	22
2.5 Onda longitudinal o de compresión	23
2.6 Onda transversal o de corte	24
2.7 Onda superficial o de Rayleigh	24
2.8 Onda de Lamb	25
2.9 Refracción	32
2.10 Ley de Snell	34
2.11 Ángulo de refracción en las interfases metacrilato-acero y agua-acero	35
2.12 Ángulos de incidencia y reflexión para una onda longitudinal	36
2.13 Amplitudes relativas de las ondas resultantes en una interfase acero-aire para ángulos de incidencia crecientes de una onda longitudinal	37
2.14 Ángulo de la onda transversal convertida en una interfase acero-aire para ángulos de incidencia crecientes de una onda longitudinal	38
2.15 Ángulos de incidencia y reflexión para una onda transversal	39

LISTA DE FIGURAS

2.16	Amplitudes relativas de las ondas resultantes en una interfase acero-aire para ángulos de incidencia crecientes de una onda transversal	40
2.17	Ángulo de la onda longitudinal convertida en una interfase acero-aire para ángulos de incidencia crecientes de una onda transversal	41
2.18	Frente de onda de una fuente finita de sonido	41
2.19	Fuente finita de sonido. Puntos central y extremos	42
2.20	Efecto de interferencia constructiva y destructiva	42
2.21	Fin del campo próximo del haz ultrasónico	43
2.22	Campos próximo y lejano del haz ultrasónico	45
2.23	Evolución de la amplitud del haz ultrasónico en los campos cercano y lejano	46
2.24	Diagrama de bloques de un equipo de ultrasonidos	46
2.25	Transductor de ultrasonidos de haz normal	48
2.26	Piezoelectricidad	50
2.27	Generación de ondas de sonido mediante el fenómeno de la piezoelectricidad	51
2.28	Representación tipo A (A-Scan)	52
2.29	Rectificación de una señal A-Scan	53
2.30	Representación tipo B (B-Scan)	53
2.31	Representación tipo C (C-Scan)	54
3.1	Sección transversal del acero galvanizado DX53D + Z100MB	57
3.2	Chapas de espesor nominal 1.9 mm empleadas en los experimentos	60
3.3	Útil desarrollado para soldar chapas en unión a solape	60
3.4	Máquina de soldadura GMAW Fronius y robot KUKA empleados en los experimentos	62
3.5	Equipo de ultrasonidos empleado en los experimentos	64
3.6	Transductor y retardo empleados en los experimentos	65
4.1	Técnica de pulso-eco con transductor de haz normal.	69

LISTA DE FIGURAS

4.2	Patrón de eco para una chapa de acero DX53D + Z100MB de espesor 1.9 mm . . .	69
4.3	Dimensiones del triángulo isósceles inscrito en la sección transversal de un cordón de solapa	71
4.4	Espesores de garganta para soldaduras en ángulo cóncava y convexa	72
4.5	Anchura de penetración en un cordón en forma de solapa	73
4.6	Geometría del cordón de solapa	74
4.7	Posiciones del transductor para la inspección del cordón de soldadura	75
5.1	Fotografías macroscópicas de las muestras soldadas	82
5.2	Defectología superficial característica de la soldadura GMAW	83
5.3	Resultados del análisis ultrasónico en 3.3Y	83
5.4	Resultados del análisis ultrasónico en 7.1Y	84
5.5	Resultados del análisis ultrasónico en 4.3Y	84
5.6	Resultados del análisis ultrasónico en 7.1X	85
5.7	Resultados del análisis ultrasónico en 6.1X	85
5.8	Resultados del análisis ultrasónico en 5.1X	86
5.9	Resultados del análisis ultrasónico en 5.1Y	86
5.10	Resultados del análisis ultrasónico en 5.3X	87
5.11	Resultados del análisis ultrasónico en 3.3X	87
5.12	Resultados del análisis ultrasónico en 6.2X	88
5.13	Micrografías de los cordones de soldadura	89
A.1	Discrepancias y complementos a UNE-EN ISO 5817: 2009.	112
A.2	Grupos de valoración.	112
A.3	Grupos de valoración para cordones de solapa válidos para espesores de pared de 0.5 mm a 6 mm. Parte 1	113
A.4	Grupos de valoración para cordones de solapa válidos para espesores de pared de 0.5 mm a 6 mm. Parte 2	114

Lista de Tablas

2.1	Modos de propagación de las ondas de sonido en un sólido	26
2.2	Propiedades del sonido para distintos materiales líquidos	27
2.3	Propiedades del sonido para distintos materiales sólidos	27
3.1	Composición química del acero DX53D	58
3.2	Propiedades mecánicas del acero DX53D	58
3.3	Propiedades del recubrimiento Z100MB	58
3.4	Espesores de las muestras	59
3.5	Condiciones generales de soldadura	63
3.6	Composición química del material de aporte UltraMag	63
3.7	Parámetros de soldadura GMAW empleados en la elaboración de las muestras . . .	64
5.1	Valores de espesor de cordón, profundidad y longitud de penetración teóricos y reales	90
5.2	Comparativa entre mediciones ultrasónica y metalográfica	91

Introducción

Los procesos de fabricación de *unión* y *corte* son muy importantes para cualquier actividad industrial [1]. De éstos, el de corte es un proceso relativamente sencillo y bien conocido, mientras que el proceso de unión es más complicado. Los procesos de unión básicos son:

1. Unión mecánica,
2. Unión adhesiva,
3. Soldadura fuerte y soldadura blanda, y
4. Soldadura.

De acuerdo con la American Welding Society y con la norma ISO 857-1:1998 (Welding and allied processes. Vocabulary. Part 1: Metal welding processes) [2], la *soldadura* se define como "una coalescencia localizada de metales o no metales producida ya sea por calentamiento de los materiales a la temperatura de soldadura, con o sin la aplicación de presión, o por la aplicación de presión por sí sola, con o sin el uso de material de relleno o de aporte".

De la definición anterior se deducen dos grandes tipos de soldadura: la *soldadura por presión* y la *soldadura por fusión*. En la primera de ellas, la ruptura o eliminación de las capas de óxido y humedad presentes en las superficies a soldar y el íntimo contacto necesario entre ellas, se consigue sometiendo las mismas a una presión recíproca, mientras que en la segunda, se emplea calor para fundir localmente los metales que se desean unir [3,4].

Aunque existen alrededor de 40 procedimientos de soldadura distintos, sólo unos pocos son importantes a nivel industrial [1]. La soldadura por presión más destacada es la soldadura por resistencia, principalmente la soldadura por puntos, mientras que la familia de soldadura por fusión más importante es la que obtiene su energía del arco voltaico, donde, como su propio nombre indica, se emplea un arco eléctrico como fuente de calor para fundir y unir metales [5].

1. Introducción

Se cree que en toda la industria del metal, la soldadura por arco es la tercera categoría más grande de trabajo que tiene lugar sólo por detrás del montaje y del mecanizado [1].

Dentro de la *soldadura por arco*, se encuentra la soldadura en atmósfera gaseosa con electrodo de metal o GMAW por sus siglas en inglés (Gas Metal Arc Welding), la cual incorpora la alimentación continua en automático de un electrodo metálico de relleno, consumible, que está protegido de la atmósfera circundante por un gas suministrado externamente, sin la aplicación de ningún tipo de presión [4,6]. En este proceso, el arco voltaico se establece entre el extremo que se desea fundir del electrodo de alambre (aditivo) y la pieza de trabajo. La corriente de fusión fluye a través de la boquilla de contacto en la antorcha de soldadura hasta el electrodo. El electrodo se funde entonces debido a su potencia interna de resistencia y al calor transferido desde el arco de soldadura. El calor se concentra, en primer lugar, debido al arco eléctrico establecido entre la punta fundente del electrodo y el baño de fusión y, en segundo, a las gotas de metal fundido que se transfieren del mismo modo hacia el baño de soldadura.

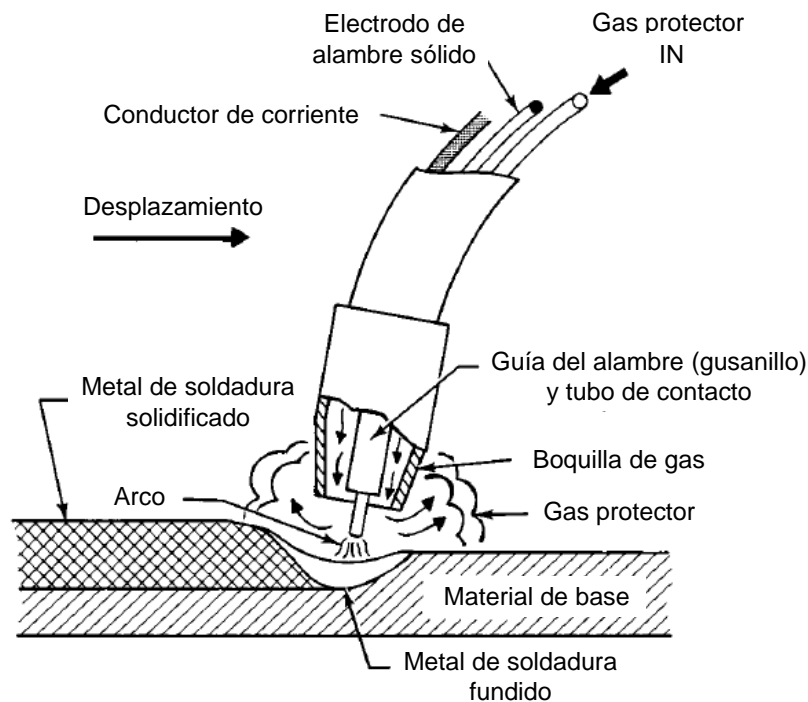


Fig. 1.1: Soldadura GMAW, con antorcha típica de cuello curvado [6].

La "envolvente de atmósfera protectora" aísla de posibles contaminantes atmosféricos tanto al electrodo y al arco voltaico como al baño fundido. Si se utilizan gases inertes (gases no reactivos, por ejemplo, un gas noble como argón, helio o la mezcla de ambos) en calidad de gas protector, se habla de soldadura en atmósfera gaseosa *inerte* con electrodo de metal o *soldadura MIG*. En cambio, si se utiliza un gas activo (por ejemplo, CO_2 o mezcla de gases que contengan CO_2 u oxígeno) se habla entonces de soldadura en atmósfera gaseosa *activa* con electrodo de metal o

soldadura MAG.

La caracterización de las uniones soldadas es de suma importancia para el industrial que quiere comprobar la calidad del material elaborado. La soldadura GMAW es un proceso dependiente de muchas variables y la estructura de la unión soldada es función del proceso y de sus parámetros [7], por lo tanto, las juntas finales deben ser controladas cuidadosamente.

La geometría del cordón es una propiedad física fundamental de las soldaduras [8]. El área de la sección transversal del cordón junto con su altura y anchura afecta a la contracción total, lo que determina en gran medida las tensiones residuales y, por lo tanto, la distorsión de la soldadura. Diferentes variables incluyendo la tasa de calor aportado, su distribución, la velocidad de soldadura, el orden y número de pasadas, la posición de las pasadas y el ángulo de inclinación del electrodo, que en última instancia determinan los ratios de enfriamiento y solidificación y, por tanto, la orientación del grano, afectan a la forma del baño de soldadura [7]. La penetración también se ve comprometida por cambios en las variables del proceso, principalmente por la corriente y la tensión de soldadura [9, 10]. El aumento de la corriente de soldadura aumenta la profundidad de penetración. Variaciones en la tensión del arco provocan la misma tendencia en la penetración, aunque su efecto no es tan notable como en el caso de la corriente.

La calidad del cordón de soldadura se constata en primera instancia mediante los correspondientes ensayos ópticos o visuales. No obstante, para garantizar una resistencia a la fatiga suficiente en cualquier unión soldada no sólo es necesario un cordón ópticamente impecable en la posición correcta sobre el componente, sino que es preciso fijar requisitos mínimos en cuanto a la longitud y a la geometría del cordón y constatar la ausencia interior de imperfecciones tales como poros, grietas y/o inclusiones metálicas [11, 12].

El ensayo de la geometría del cordón, de sus características interiores así como de su textura/dureza, se realiza por lo general con ayuda de secciones metalográficas [12, 13]. De la misma forma, el control de fabricación con conclusiones sobre la resistencia de la unión soldada se ejecuta también mediante un ensayo mecánico-tecnológico, destacando el ensayo de tracción. El análisis metalográfico de las muestras se trata de la técnica más fiable para la estimación de las propiedades del cordón [14]. Sin embargo, aparte del hecho de que es una técnica destructiva, presenta la desventaja de ser lenta y limitada de realizar, puesto que implica la preparación de probetas mediante varias etapas de pulido y ataque químico, para su posterior examen microscópico en sucesivos intervalos de tiempo de acuerdo con el plan de inspección. Asimismo imposibilita la inspección on-line o automatizada [15].

Además de las comprobaciones rutinarias especificadas en el plan de ensayo, tras una modificación de los parámetros de soldadura o un cambio de los componentes de la instalación así como posibles alteraciones en las piezas individuales, resulta necesaria una nueva valoración de la calidad del cordón mediante secciones transversales metalográficas, en lo que se conoce como ensayos de rectificación, por lo que el número de ensayos destructivos puede aumentar considerablemente.

1. Introducción

Adicionalmente, la creciente presión para una mayor productividad, efectividad en los costes y calidad en la producción industrial, particularmente en el sector de la automoción, requieren de nuevas técnicas de proceso y control de la calidad durante la producción que permitan satisfacer dichas velocidades y/o tasas de producción y las demandas cada vez más exigentes de los clientes [14,16].

Por todo ello y desde un punto de vista práctico, es beneficioso examinar la calidad de las uniones soldadas utilizando métodos de evaluación no destructivos, métodos NDT por sus siglas en inglés, (Non-Destructive-Testing), los cuales se pueden realizar siempre que sea necesario sin acarrear gastos específicos [14].

En este sentido, con una técnica de inspección NDT se logran dos objetivos principales durante cada fase de la cadena productiva. En primer lugar, controlar el proceso, donde el sistema brinda información inmediata sobre el proceso de producción. Estas rápidas informaciones sobre soldaduras defectuosas u otros problemas de fabricación permiten al operador intervenir y corregir el problema antes de que se produzca chatarra, con lo que se mejora la estabilidad del proceso. El segundo objetivo es verificar y documentar la calidad del producto y evitar que el material defectuoso entre en las próximas etapas de manufactura, evitando así el gasto de tiempo y energía en material de desecho.

Así pues, si una aplicación concreta no permite la sustitución completa de los ensayos destructivos por una técnica NDT, por lo menos se pueden minimizar. Al garantizarse la calidad de la unión por medio de una ventana de proceso prefijada, mediante un control de proceso de los diferentes parámetros junto con un ensayo no destructivo se puede reducir, en función de la seguridad del proceso, la frecuencia de los ensayos destructivos.

Por lo tanto, numerosas investigaciones se han centrado en el desarrollo de métodos de ensayo no destructivos. Los métodos NDT en general y para la verificación de soldaduras en particular se pueden subdividir en dos categorías principales: métodos para *inspección superficial* y métodos para *inspección volumétrica* [17,18].

Los métodos para la inspección de superficies incluyen principalmente las técnicas de visión, de líquidos penetrantes, de partículas magnéticas y de Eddy current o corrientes de Foucault (EC). La importancia y la fiabilidad de la inspección superficial en el caso de soldaduras se basan en la suposición de que los defectos más graves (grietas o fracturas) se originan en la superficie, y, por tanto, se propagan desde ella, mientras que la posibilidad de existencia de inclusiones interiores en la soldadura no es tan importante desde un punto de vista estructural (aunque realmente son un riesgo potencial). Entre las técnicas de inspección superficial, los métodos de líquidos penetrantes y de partículas magnéticas son considerados como los métodos más económicos y, por ello, los más frecuentemente empleados, ofreciendo ambos un alto grado de sensibilidad y resultados fiables. No obstante el primero de ellos está cayendo en desuso al poner al inspector en contacto directo con productos químicos nocivos para la salud [19].

En comparación con la inspección volumétrica, la inspección superficial es más sencilla de llevar a cabo y más económica. Sin embargo, en el caso de soldaduras sometidas a altas exigencias, como es nuestro caso, no es suficiente con examinar sólo la superficie. Con esta técnica, además de no poder localizar poros y grietas internas, tampoco se es capaz de detectar uno de los defectos más graves en la soldadura como es la falta de fusión en la raíz. La radiografía y los ultrasonidos son los métodos clásicos para la inspección volumétrica y, por lo tanto, los que se utilizan con frecuencia como indispensables para la valoración no destructiva de soldaduras. De las dos técnicas, la radiográfica es la más antigua.

La inspección radiográfica o por rayos X proporciona un registro permanente y un resultado muy claro y fiable, especialmente cuando se trata de defectos volumétricos tales como poros e inclusiones [17,18]. Con esta técnica se puede penetrar profundamente en casi cualquier material con el objeto de encontrar defectos sub-superficiales. No obstante, su baja velocidad y los peligros potenciales de radiación que conlleva limitan su uso [19]. Los resultados en la mayoría de los casos requieren de una interpretación del operador y rara vez se utilizan en entornos automatizados.

Los ultrasonidos (UT) fueron introducidos como una técnica NDT para la inspección de soldaduras en la década de los 60 [16]. Desde entonces, la técnica ha experimentado un amplio desarrollo y ganado cada vez mayor aceptación. De hecho, en comparación con el resto de métodos NDT, se trata de la técnica de ensayo no destructivo con mayor y más rápido crecimiento en los últimos tiempos [15,18]. Consecuentemente, los UT son en la actualidad el medio más eficaz para detectar discontinuidades físicas a lo largo del espesor de los metales [17] y, por lo tanto, para inspeccionar y validar la calidad de las estructuras soldadas [15,16].

Los ensayos por ultrasonidos utilizan un haz de ondas mecánicas de sonido de alta frecuencia (longitud de onda corta) transmitidas desde un transductor y recibidas por el mismo u otro transductor [17]. Las ondas ultrasónicas poseen dos características únicas [20], lo que les confieren ese carácter tan ventajoso frente a otros métodos alternativos:

1. Las ondas ultrasónicas viajan lentamente, unas 100.000 veces más lento que las ondas electromagnéticas. Esto proporciona una forma de mostrar o visualizar la información en el tiempo y/o de crear retardos variables.
2. Las ondas ultrasónicas pueden penetrar fácilmente en materiales opacos, mientras que muchos otros tipos de radiación, como la luz visible, no pueden. Este hecho, por su parte, proporciona una manera muy conveniente de sondear, investigar y visualizar el interior de objetos opacos.

Además de poderse aplicar a sistemas que son ópticamente opacos sin la necesidad de preparar ninguna muestra, se trata de una técnica no destructiva y no invasiva, capaz de realizar mediciones rápidas y puede ser utilizada para caracterizar discontinuidades tanto superficiales como subsuperficiales o internas, dado que el sonido puede ser dirigido o direccionado con un

1. Introducción

elevado grado de precisión [18]. Así, aparte de la detección de defectos, los UT tienen otros usos, como la medición de espesores, además de la determinación de la microestructura [14].

El principio fundamental de los UT se basa en el hecho de que los materiales sólidos son buenos conductores de las ondas de sonido y que estas ondas no sólo se reflejan desde las interfases o fronteras entre diferentes medios sino también desde defectos internos (separaciones de material, inclusiones, poros, etc) [14]. Por lo tanto, las ondas acústicas a lo largo de su recorrido y propagación a través de los materiales metálicos llevan múltiples informaciones sobre las propiedades mecánicas y físicas del material bajo estudio. Además, la inspección mediante ultrasonidos requiere normalmente que las discontinuidades o las inhomogeneidades presentes en el medio explorado posean comportamientos acústicos diferentes al material base bajo condiciones de inspección ultrasónica similares. Este comportamiento diferenciado permite a la técnica de inspección por ultrasonidos detectar defectos, granos, imperfecciones, heterogeneidades o cualquier otra característica microestructural relacionada para un material dado.

Así pues, las ondas ultrasónicas se pueden utilizar para detectar todos los defectos de soldadura más comunes como porosidad, inclusiones, grietas, falta de penetración y falta de penetración, en cualquier tipo de material elástico [17, 18], así como investigar su microestructura y su geometría [21]. Básicamente, cuando las ondas penetran en el material, "reaccionan" con las estructuras y los defectos del material (reflectores), reflejando o "rebotando" parte del sonido. Así, las ondas recibidas contienen información valiosa sobre la estructura y las imperfecciones internas. Una muy buena introducción al estado de arte de los ultrasonidos, así como a sus fundamentos y aplicaciones se puede encontrar en [20, 22–28].

Por todo ello la tecnología de inspección no destructiva es ampliamente utilizada en la aviación, en las industrias aeroespacial, nuclear y de tuberías y recipientes a presión, en estructuras off-shore y aplicaciones navales, haciendo mención especial también, aunque no por su carácter industrial, a su amplia difusión en el ámbito médico [15, 16, 29]. En todas estas aplicaciones, la soldadura desempeña un papel crítico, por lo que es igualmente importante durante su ejecución o construcción la inspección y verificación de las soldaduras terminadas mediante métodos NDT. Cualquier complicación o retraso asociados bien a la soldadura en sí o bien a su inspección pueden impactar negativamente en el coste y la planificación del proyecto.

Durante las últimas décadas, la investigación y el desarrollo de los ultrasonidos como método de inspección no destructivo se han dirigido especialmente hacia la inspección en tiempo real u on-line [1, 15, 30–34], transductores phased-array [19] y al procesamiento de señales para el tratamiento de imágenes [35] en placas gruesas [17].

La producción automatizada de juntas soldadas de alta calidad requiere de un medio para la medición de la calidad de la soldadura en tiempo real y de una estrategia de control de realimentación para la regulación de dicha calidad [31]. La inspección ultrasónica de soldaduras durante el proceso de soldeo, tiene el potencial de detectar la geometría del baño de fusión y las discontinuidades en tiempo real [15]. Los transductores piezoeléctricos de contacto tradicionales

se han venido utilizado para generar y recibir ultrasonidos en la inspección de soldaduras off-line, pero no son adecuados para la inspección automatizada on-line debido a la necesidad de medios de acoplamiento líquidos o en gel entre las muestras y los transductores, los cuales se evaporan dadas las altas temperaturas que se alcanzan durante la soldadura.

Un método alternativo consistente en la utilización de un láser pulsante para la generación de los ultrasonidos y un transductor electromagnético-acústico (EMAT) para la recepción de los mismos fue desarrollado por Tsun-Yen Wu et al [15] para la determinación de la profundidad de penetración tanto en tiempo real como a posteriori. El empleo de esta técnica permite la toma de mediciones durante el proceso en ambientes automatizados de gran volumen al no emplear transductores de contacto directo y/o de contacto cercano con la pieza de trabajo ni medios de acoplamiento [34]. Otros trabajos similares en cuanto al empleo de transductores sin contacto y a la generación de ultrasonidos vía láser para la monitorización de la calidad de la soldadura y la detección de defectos de soldadura pueden encontrarse en [1, 30, 33].

En [19] los autores proponen la técnica ultrasónica phased-array (UT-PA) para la inspección no destructiva de juntas de soldadura. Esta nueva técnica es una versión modificada, más bien una extensión, del método UT convencional, la cual emplea varios elementos piezoeléctricos en vez de sólo uno. Los elementos están contenidos en un mismo y único transductor. Sin embargo, gracias al control del procesador, cada elemento de la disposición se puede manipular de forma individual o independiente, para de forma conjunta coordinarse y producir un haz ultrasónico focalizado convergentemente. El resultado es la consecución de ondas sincronizadas y dirigibles. Con haces de ondas controlados electrónicamente es posible detectar defectos en uniones con geometría compleja y en partes irregulares con estructura de grano anisotrópico como el acero inoxidable, lo que permite una inspección volumétrica completa también en esos casos. La convergencia del haz también mejora la resolución espacial otorgando mejores características de dimensionamiento y mapeo. Estas capacidades ampliadas de la técnica UT-PA se pueden realizar además en una fracción del tiempo requerido cuando se emplean métodos UT convencionales.

Uno de los últimos trabajos con respecto al procesamiento de la señal ultrasónica y posterior reconstrucción de la imagen correspondiente a la macro estructura de la sección transversal de la soldadura es el llevado a cabo por [35]. En él se concluye que el tratamiento de la señal procedente de la dispersión (backscattering) ultrasónica es efectivo para medir la profundidad de penetración de las soldaduras.

Revisada la bibliografía de los últimos tiempos, podemos afirmar que son numerosos los métodos ultrasónicos desarrollados en relación con los ensayos NDT de uniones soldadas. Desafortunadamente, aunque bien establecidos, estos métodos y técnicas no son de fácil aplicación en la industria del automóvil [36]. En la producción moderna del automóvil, más de 300 piezas de chapa de embutición profunda se unen entre sí por medio de más de 6000 puntos de unión en cada carrocería [37]. Se ensamblan principalmente láminas de acero, aunque también en algunos casos, chapas de aluminio. Los espesores típicos de estos materiales están en el intervalo de

1. Introducción

0.7-2 mm. La carrocería de un VW 250 o Polo A05 cuenta, concretamente, con 6060 uniones equivalentes, de las cuales 4828 se realizan en planta y las 1232 restantes, a través de proveedores. 3116 (51.42%) de esas uniones se corresponden con puntos de soldadura por resistencia. El resto de técnicas de unión comprende la aplicación de masillas o adhesivos (630 cm^3), las soldaduras GMAW (2.6 m en 105 cordones), laser (3.11 m en 2 cordones) y de pernos "Tucker" (122 uniones) y la embutición de chapas o clinchado (42 uniones).

Como ya se ha destacado previamente, la inspección vía ultrasonidos de la calidad de las soldaduras viene siendo utilizada desde hace tiempo como uno de los métodos más frecuentes en la industria, especialmente en el área de la inspección de servicio "in situ" y de la inspección de soldaduras en placas gruesas (de más de 8 mm de espesor según norma UNE EN ISO 17640:2011. Ensayo por ultrasonidos. Técnicas, niveles de ensayo y evaluación [38]) [17]. Pero en el sector de la automoción las chapas involucradas en los procesos de fabricación no van a superar en ningún caso los 2 mm de espesor. No obstante, Carpentier y Rudlin en [39] llevaron a cabo una serie de experimentos mediante los métodos UT convencional y phased-array en secciones soldadas de juntas a tope y chapas finas con defectos simulados utilizando los procedimientos descritos en UNE EN ISO 17640:2011 y UNE EN 23279:2010 (Ensayo por ultrasonidos. Caracterización de las indicaciones en las soldaduras) [40], los cuales aplican a soldaduras de acero ferrítico con un espesor mínimo de 8 mm. Los resultados muestran que los procedimientos de la norma UNE EN ISO 17640:2011 se pueden adaptar de igual forma para la inspección, detección y dimensionamiento en espesores de hasta 4 mm.

En el sector del automóvil, a fecha de hoy los ultrasonidos se vienen aplicando de forma sistemática para la inspección de puntos de soldadura por resistencia [37, 41]. La inspección de puntos de soldaduras asistida por ordenador ha alcanzado niveles punteros tecnológicamente hablando y los aspectos relacionados con la estandarización del método y entrenamiento o capacitación de los inspectores son fuertemente dominados. Por ello la inspección de puntos de soldadura mediante ultrasonidos es empleada por prácticamente la totalidad de los fabricantes.

La demanda creciente de los conductores por unas características más lujosas y exigentes en el vehículo se traduce en accesorios mejorados que conllevan el aumento de peso del mismo [41, 42]. Un mayor peso también significa un mayor consumo de gasolina. Esta es sólo una de las razones para el "diseño ligero" de los nuevos vehículos, además de la normativa cada vez estricta en materia de protección del medio ambiente. Mientras que el acero era con más de un 80% el material más importante para la industria del automóvil en el pasado, otros materiales como el plástico, el magnesio y el aluminio se vuelven cada vez más importantes en detrimento de aquel. El uso de varios materiales conducirá inevitablemente a nuevas técnicas de unión ya que las técnicas tradicionales, principalmente la soldadura por puntos, para la construcción de la carrocería, se pueden utilizar solamente en parte. En definitiva, una combinación de métodos sustituirá a un único método dominante en un futuro no muy lejano. Y asociado al cambio de materiales y técnicas de unión, inevitablemente el aseguramiento de la calidad debe del mismo modo adaptarse a los cambios en las condiciones de fabricación. Así pues, la coyuntura actual

en este ámbito demanda procesos avanzados, en términos de variables NDT, en el campo de la gestión de la calidad.

Relacionado con estos cambios incipientes, por ejemplo, Titov et al. y Goglio et al. en [36,43] respectivamente, investigan nuevos métodos ultrasónicos en modo pulso-eco para la detección de huecos o de la falta de adherencia en las interfases de uniones adhesivas de chapas de acero y/o aluminio con capas de masilla de diverso espesor en el rango de 0.1-1 mm. Kerckel et al., por su parte en [34], estudia la prometedora posibilidad de emplear ultrasonidos generados y recepcionados por la técnica laser para el seguimiento on-line de la calidad de las soldaduras de chapas tailor-blank. Las soldaduras tailor-blank son conjuntos de piezas del mismo material o de materiales diferentes compuestas de chapas de diversos espesores y/o propiedades soldadas entre sí en una junta a tope. En la carrocería del automóvil se empiezan a emplear en la construcción del bastidor y de los paneles de cierre.

Por lo que respecta a la soldadura GMAW en una carrocería de un automóvil, este tipo de soldadura se emplea en las uniones de las bisagras de las puertas, las anillas de fijación de los asientos y en muchos otros componentes, principalmente del bastidor, donde se requieren uniones soldadas largas en las cuales es imprescindible la consecución de un cierre hermético entre las dos piezas de metal que se van a unir [41]. En el caso de un VW 250 o de un Polo A05, un total de 105 uniones o cordones se realizan mediante esta técnica de soldadura: concretamente, 65 MIG y 40 MAG. De las 105 uniones soldadas, 104 (99%) se corresponden con un cordón en forma de solapa. De hecho, según [44] las soldaduras angulares, incluyendo no sólo el cordón en junta de solapa, sino también en las juntas oblicua y de esquina y en la unión en T, representan aproximadamente el 80% de todas las uniones que se realizan mediante soldadura por arco eléctrico.

Hasta el momento, en toda la bibliografía que se ha estudiado, sólo se ha considerado el caso de soldaduras en unión o junta a tope, ya sea con penetración total o parcial. Respecto a soldaduras en juntas y cordones de solapa apenas hay trabajo realizado. Los cordones I en junta a tope son aquellos en los que las piezas se encuentran en un mismo plano aproximadamente y enfrentadas entre sí, forman una unión y se juntan mediante soldadura [12], tal y como se puede ver en la figura 1.2(a). En cambio, los cordones en los que las distintas piezas a unir se solapan en paralelo y se sueldan por la cara frontal reciben el nombre de cordones de solapa (figura 1.2(b)). Se puede considerar como un cordón angular, en el que los flancos del cordón son verticales entre sí, esto es, forman 90°, y la cara frontal de la chapa superior se ha visto afectada por la soldadura al 100% (completamente).

En la vista esquemática de la sección transversal de la soldadura a tope presentada en 1.2(a) se definen las dimensiones críticas de profundidad de penetración (PP), altura del refuerzo (AR) y ancho del cordón (AC). Entre ellas, la profundidad de penetración es el parámetro geométrico más importante que determina la calidad de la soldadura, y por lo tanto, todos los trabajos desarrollados con la inspección ultrasónica como principal herramienta se han centrado en intentar determinar esa magnitud.

1. Introducción

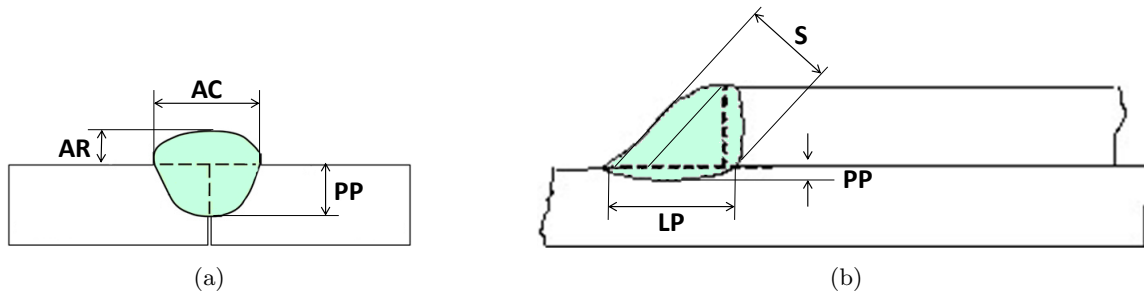


Fig. 1.2: (a) Soldadura a tope y (b) soldadura a solape, con sus principales dimensiones [11,12].

Así lo atestiguan, por ejemplo, los trabajos [31,32], donde todos los esfuerzos para el control de la calidad se centran en la estimación de la penetración, mediante la técnica de pulso-eco desde la superficie opuesta a la soldadura en el primer caso; y, en el segundo, a través de la técnica de la difracción del tiempo de vuelo (TOFD por sus siglas en inglés) con dos transductores angulares dispuestos sobre la superficie de la soldadura, uno a cada lado del cordón.

Yung et al. en [21], en cambio, no se limitan únicamente a la estimación de la profundidad de penetración, sino que proponen un método en modo pulso-eco con un único transductor dual angular emplazado a cada lado cordón, para la medición cuantitativa de la altura y anchura, esto es, de la geometría del cordón en el material base, así como de su alineamiento y simetría con respecto a la línea central de soldadura.

Los autores en [15], por su parte, también describen una metodología para la medición de la profundidad de penetración de soldaduras en juntas a tope de chapas finas, empleando transductores sin contacto (sistema laser para la generación y EMAT para la recepción de los ultrasonidos), pero analizando la señal ultrasónica en el dominio de la frecuencia. Con el espectro de frecuencias de la señal se propone un modelo de predicción de la penetración empleando los coeficientes de reflexión estimados como criterio de resolución.

Sin embargo, un cordón a solapa presenta la geometría mostrada en la figura 1.2(b). Las soldaduras en juntas de enfrentamiento perpendicular propias de esquinas o finales de pieza, son básicamente triangulares vistas desde su sección, aunque su forma no es siempre un triángulo perfecto o isósceles. Las dimensiones críticas en este tipo de soldadura son el espesor de garganta (S), la profundidad de penetración (PP) y la longitud o anchura de penetración (LP), siendo la primera de ellas la característica más destacada. Consecuentemente, será sobre el espesor de garganta el parámetro principal sobre el que adquirir información en nuestra investigación.

No obstante, las soldaduras en junta de solapa junto con otras formas de cordón angular son unas de las más difíciles no sólo de ejecutar o realizar sino también de evaluar [44]. Estas soldaduras requieren un aporte de calor mayor que en una junta a tope del mismo grosor y ello, junto con un dominio relativo de la técnica, puede derivar en una falta de penetración y/o defectos de fusión que no pueden ser detectados en ningún caso por un examen visual y muy difícilmente

por otras técnicas NDT.

Tradicionalmente y como aconseja la norma, la inspección de soldaduras se realiza con transductores angulares en modo de pulso-eco (emisión y recepción) o de transmisión (TOFD, fundamentalmente). Ya sea el sistema de inspección en esencia post-proceso y de contacto (método tradicional o convencional), o en tiempo real y sin contacto, el hecho de que se empleen principalmente transductores angulares se debe a su capacidad para generar ondas transversales o de corte. Éstas, en comparación con las ondas longitudinales o de compresión, ofrecen mayor reflexión desde las inhomogeneidades alrededor de la línea de fusión (interfase del cordón de soldadura) y permiten el emplazamiento del transductor del lado de la soldadura en vez desde su cara opuesta [21].

La mayor parte de los métodos desarrollados también se basan, por otro lado, en el modo de transmisión. En una configuración simple, dos transductores, uno actuando como transmisor y otro como receptor, se sitúan uno a cada lado de la cabeza del cordón de soldadura. Entonces el sonido que sale del transmisor se propaga a través de las chapas y de la soldadura como un frente de ondas guiado, hasta que es recibido al otro lado del cordón por medio del segundo transductor, el receptor. Una soldadura óptima se caracteriza por una señal con una amplitud elevada mientras que una defectuosa, lo hace por una señal de baja intensidad [41].

Una vertiente del modo de transmisión muy empleada últimamente para la inspección de soldaduras, así como para el dimensionamiento de la zona soldada, es la técnica de la difracción del tiempo de vuelo o TOFD [7, 15, 32]. Esta técnica consiste en que para un reflector plano (grieta, raíz de soldadura, línea de fusión, etc.) dentro del material, se pueden identificar cuatro indicaciones a través de la medición del tiempo de vuelo o de llegada de la señal ultrasónica: i) una onda lateral, ii) el eco difractado desde la parte superior del reflector, iii) el eco difractado desde la parte inferior del reflector, y iv) el eco de fondo, procedente de la pared posterior. Un punto interesante de esta técnica es que existen diferencias de fase en los ecos recibidos desde la parte superior e inferior del reflector. Además, el eco de fondo y la onda lateral también tienen fases opuestas. Por lo tanto, basándose en la fase de una indicación, se puede determinar si ésta se ha originado a partir de la parte superior o inferior del reflector y, por ende, dimensionarlo de una forma mucha más precisa.

Como se ha dicho en un párrafo anterior, el empleo de uno o varios transductores angulares posibilita el emplazamiento del transductor sobre la misma superficie que la de la soldadura, a uno o a ambos lados simultáneamente de la misma. Sin embargo, la configuración especial de la carrocería de un automóvil limita en gran medida la posibilidad de acceder a las uniones soldadas con esta disposición. Las chapas que la componen contienen, por un lado, multitud de formas curvas más o menos abruptas que rompen con el plano de soldadura y, por otro, se solapan sucesivamente unas sobre otras, reduciéndose así el espacio mínimo necesario a ambos lados del cordón de soldadura para acceder a él con un transductor angular.

1. Introducción

Por otro lado, la técnica de transmisión requiere acercarse y/o alejarse del cordón simultáneamente desde ambos lados y mantener la distancia correspondiente a cada lado del cordón para primero recibir la señal de forma apropiada y, segundo, para poder establecer las razones geométricas con respecto a la línea central de la soldadura, lo que a menudo no es factible en la práctica.

Por lo tanto, la técnica más adecuada para nuestro caso donde la accesibilidad es limitada viene dada por la variante de pulso-eco, lo que permite la inspección, al menos, por un único lado si se emplea un transductor angular. Además de por lo recién descrito, esta elección se debe a su relativa simplicidad y facilidad de aplicación con respecto a otros métodos y al hecho de que las señales obtenidas pueden relacionarse directamente con las superficies reflectantes de la junta [36].

Hardt y Katz y Ebuchi et al. emplearon en [31, 35] respectivamente un único transductor longitudinal de haz recto en modo pulso-eco para la determinación de la profundidad de penetración de uniones soldadas en juntas a tope, emplazando el transductor en la cara opuesta a la soldadura, esto es, por debajo de la misma. Lo que se va a proponer en esta investigación es el emplazamiento directo del transductor sobre el cordón de soldadura. Para ello habrá que superar el problema de la rugosidad propio de las soldaduras mediante el empleo de un medio de acoplamiento capaz de rellenar todos los posibles huecos y/o poros de la superficie para transmitir el ultrasonido dentro de la soldadura.

Así pues, en este trabajo se presenta una nueva estrategia para la inspección mediante ultrasonidos de soldaduras en junta de solapa de chapas finas con una aplicabilidad directa en el sector de la automoción. Esta metodología emplea un único transductor longitudinal de haz recto emplazado directamente y en contacto sobre el cordón en la versión de pulso-eco para medir los parámetros geométricos de la sección transversal del cordón, especialmente el espesor, y detectar posibles defectos internos del mismo. En concreto se simularan las situaciones de una soldadura buena, una soldadura con penetración escasa o insuficiente, una soldadura con recrecido de la raíz o sobreespesor en el lado opuesto a la soldadura y una soldadura con porosidad interna excesiva. El principio de base de esta metodología radica en la relación entre la línea de fusión o frontera entre la zona de soldadura y la sonda afectada por el calor del material base y los ecos de fondo de la señal ultrasónica.

1.1 Objetivos

El objeto general de este proyecto es valorar la eficiencia y la fortaleza del método de ultrasonidos en modo pulso-eco para la inspección de soldaduras GMAW en uniones a solape de chapas finas de acero DX53D + Z100MB con un único transductor longitudinal posicionado directamente sobre la cabeza del cordón de soldadura.

Los objetivos particulares a estudiar en este trabajo se concretan en:

- Desarrollar y proponer una estrategia de inspección no destructiva con principio fundamental la relación directa existente entre la línea de fusión de la soldadura (interfase entre las zonas de material fundido y de material base) y los ecos de fondo de la señal ultrasónica. Así, la metodología permitirá relacionar las propiedades de las señales obtenidas (tiempo de vuelo, amplitud y "ruido") con las superficies reflectantes de la junta para:
 - Determinar el perfil geométrico del cordón tanto en la cabeza como en la raíz.
 - Estimar los parámetros en la sección transversal de espesor de cordón, profundidad de penetración y longitud o anchura de penetración.
 - Detectar posibles defectos internos del cordón tal como poros, grietas y/o falta de fusión en los flancos.
- Establecer patrones o estándares ultrasónicos específicos y característicos de los perfiles de:
 - i) soldadura óptima; ii) soldadura con recrecido de la raíz o sobreepesor en el lado opuesto a la soldadura; iii) soldadura con penetración escasa o insuficiente, y iv) soldadura con porosidad interna, con los que de forma comparativa poder determinar la bondad o calidad de una soldadura con cordón en forma de solapa de aceros suaves-medios de poco espesor.

Inspección mediante Ultrasonidos

2.1 Historia y Desarrollo

El uso del sonido para determinar la integridad de los objetos es probablemente tan antiguo como la capacidad humana para la fabricación de utensilios cerámicos y/o metálicos. Nuestro idioma contiene muchas palabras y frases que ilustran la aceptación de este hecho y hacen alusión a la forma en que se utilizó el sonido en el pasado para contrastar la consistencia de la materia. Expresiones tales como "sonar sincero" ocupan un lugar común en el lenguaje cotidiano para indicar calidad u honestidad.

Estas frases se refieren al hecho de que un fuerte golpe sobre un objeto sólido establece una vibración a la frecuencia natural de dicho objeto. De hecho, así es como una campana o cualquier otro instrumento de percusión produce música. Cualquier alteración importante en la homogeneidad del objeto distorsionará esa frecuencia natural e indicará, por tanto, que existe un problema.

El problema con este simple enfoque para testear la calidad de un objeto es que se necesita una imperfección relativamente grande para causar un cambio significativo en el sonido capaz de ser detectado por el oído humano. Esto es debido a que el factor determinante es la longitud de onda del sonido que se encuentra con la imperfección en relación con el tamaño de dicha discontinuidad. La longitud de onda, a su vez, depende de la velocidad del sonido en el objeto y de la frecuencia, o tono, de la onda de sonido. Dentro de la gama humana de frecuencias sonoras audibles (ver figura 2.2), la longitud de onda es más bien grande en la mayoría de los metales. No obstante, no fue hasta el desarrollo de la capacidad técnica para generar y detectar ondas de sonido a frecuencias mucho más altas cuando pudieron ser detectadas pequeñas discontinuidades en los materiales.

Los primeros pasos se produjeron entre los años 1870 y 1880 con la publicación de la obra de Rayleigh acerca del sonido, "The Theory of Sound". Este estudio trataba sobre la naturaleza y las propiedades de las ondas de sonido en los sólidos, líquidos y gases, lo que condujo al desarrollo

2. Inspección mediante Ultrasonidos

de una serie de técnicas que a día de hoy aún se siguen empleando ampliamente en el campo de los ensayos no destructivos.

Los medios para generar y detectar ondas sonoras a frecuencias por encima del rango audible continuaron poco después del descubrimiento en paralelo del efecto piezoeléctrico por los hermanos Curie y Lippmann respectivamente. En 1880, los Curie comprobaron que al aplicar una presión mecánica sobre láminas de ciertos cristales cortados de una forma determinada, se generaba un potencial eléctrico. Al año siguiente Lippmann descubrió la veracidad del hecho contrario, es decir, que la aplicación de una señal eléctrica a dichas láminas provocaba una distorsión mecánica en las mismas. Los cristales de cuarzo, turmalina y sal de Rochelle se encuentran entre los materiales que de forma u origen natural muestran el efecto piezoeléctrico.

Con el transcurso de los años surgieron muchas aplicaciones con este efecto como principio funcional, desde micrófonos de cristal y pastillas de gramófono hasta generadores de chispa para encendedores de cigarrillos y, por supuesto, transductores ultrasónicos para ensayos no destructivos. Sin embargo, el crecimiento en el uso de la piezoelectricidad fue lento. Ya en 1912, tras el desastre del Titanic, se sugirió la utilización de las ondas de sonido para la detección de icebergs en el mar, una idea que recibió estimulación adicional durante la Primera Guerra Mundial para la detección de submarinos. El sistema de pulso-eco desarrollado en un principio para esta aplicación, dio lugar en el periodo de entreguerras a otros usos de carácter pacífico en el campo de la hidrografía para trazar las profundidades del océano y la pesca, donde se empleó un sonar de eco para detectar bancos de peces.

Sokolov, en Rusia, fue el primero en sugerir el uso de las ondas ultrasónicas para detectar discontinuidades en los metales. En 1929, describió algunos experimentos en los cuales generó ondas ultrasónicas en muestras de hierro fundido y acero. En 1935, caracterizó un diseño de transductores piezoeléctricos para generar y detectar ultrasonidos, incluyendo un método de acoplamiento del sonido al metal. Su método operaba a través de una técnica de transmisión mediante la aplicación de ondas continuas con transductores de cuarzo y mercurio como medio de acoplamiento. Un generador de corriente alterna era el encargado de accionar el transmisor de cristal de cuarzo y las vibraciones que alcanzaban el receptor, también de cuarzo, generaban una señal alterna la cual se podía medir.

Durante el periodo de entreguerras se trabajó ampliamente en el uso de esta técnica, sobre todo en Rusia y Alemania. Sin embargo, existía un problema de alcance considerable con los ensayos de onda continua y gran parte del trabajo experimental se concentró en tratar de dar con una solución al respecto. El principio de la técnica de onda continua se fundamentaba en que la energía transmitida a través de la muestra generaría una señal de amplitud determinada siempre y cuando no existiese obstrucción alguna. De esta forma, parte de la energía acústica sería obstaculizada por una discontinuidad de manera que la señal recibida resultante sería más débil que aquella.

Este principio resultaba fiable siempre y cuando hubiera energía suficiente para completar

una transición completa de la muestra, como era el caso de grandes piezas de fundición, donde el tamaño de grano atenúa rápidamente el sonido. En cambio, si no había suficiente energía para configurar múltiples reflexiones del sonido a través de la muestra, las ondas reflejadas se sumaban con las ondas de sonido posteriores produciendo confusión. Si las reflexiones estaban en fase con la onda continua, se producía un aumento aparente en la energía transmitida. En cambio, si las reflexiones estaban desfasadas con respecto a la onda continua, la señal se volvía más débil, dando lugar a una indicación errónea. El mismo efecto pudo observarse en muestras más estrechas, donde el haz podía reflejarse desde las paredes laterales. Esta trayectoria del haz reflejado, siendo mayor que la del haz directo sin reflejar, también podría crear interferencia constructiva o destructiva con la señal principal.

Este problema limitó en gran medida el desarrollo y el uso de los ultrasonidos para la detección de fallos hasta la Segunda Guerra Mundial, cuando varios investigadores a ambos lados de las naciones combatientes adoptaron la técnica empleada en el sonar de eco conocida como pulso-eco (eco de pulsos). En este sistema, pulsos cortos de sonido son transmitidos a intervalos regulares y tanto los impulsos transmitidos como los ecos resultantes, mostrados en un tubo de rayos catódicos (CRT) en la primera versión de este sistema. El intervalo entre los pulsos transmitidos está dispuesto para ser lo suficientemente grande como para que todas las reflexiones internas se hayan desvanecido antes de que se inicie el siguiente pulso, evitando así los efectos de interferencia previamente comentados. Tanto el transmisor como el receptor pueden ser posicionados sobre la misma superficie. El tiempo de barrido del CRT puede ser dispuesto para mostrar uno o más períodos de tránsito, y la posición del pulso inicial y los ecos posteriores se puede utilizar para determinar la profundidad de las diversas superficies reflectoras, incluyendo las discontinuidades.

El sistema de pulso-eco fue concebido alrededor de 1942. En Gran Bretaña, su desarrollo fue atribuido a Sproule, y en Estados Unidos, a Firestone. Después de la guerra, los dos enfoques fueron comparados junto con los avances que se dieron en Alemania. La principal diferencia consistía básicamente en que Sproule había utilizado separadamente los elementos transmisor y receptor, mientras que Firestone empleó el elemento transmisor también como receptor. En esta etapa del avance en la detección de discontinuidades por ultrasonidos, sólo se encontraban en uso técnicas de ondas compresivas de "haz directo", adecuadas para la detección de reflectores paralelos a la superficie de exploración. Los intentos de emplear un haz en ángulo que se viera reflejado desde superficies con otras orientaciones dieron resultados confusos debido a la existencia de la conversión de modo en los sólidos, tal y como se explica en la sección 2.2.4.6. Con sólo una pequeña desviación del haz respecto a la normal de la superficie de ensayo, sendas ondas de compresión y ondas transversales se generan en el objeto que está siendo ensayado. Estas ondas viajan a través del sólido a diferentes ángulos de refracción y a diferentes velocidades, haciendo extremadamente complicada la interpretación de los ecos mostrados.

En 1947, Sproule trazó un diseño de transductores que generaría sólo ondas transversales en la muestra, permitiendo el desarrollo de técnicas ultrasónicas para muchos otros tipos de discontinuidades aparte de las paralelas a la superficie de inspección en las industrias de soldadura,

2. Inspección mediante Ultrasonidos

aeroespacial y de fundición. No es de extrañar pues, que a este avance le acompañase un rápido incremento en el uso y aplicación de los ultrasonidos. Durante los siguientes 20 años, gran parte del desarrollo en las técnicas de ultrasonidos, a diferencia de la instrumentación, se centró en el dimensionamiento preciso de los reflectores detectados por el haz. Algunos de estos métodos pretendían estimar el tamaño real del reflector, otros tenían por objeto evaluar su área de superficie mínima teórica, mientras que otros trataron de proporcionar un estándar general de "pasa-no pasa". En Gran Bretaña, la técnica de caída de intensidad (intensity drop technique) desarrollada por Abrahams empleaba los extremos trazados a una caída de -6 dB o -20 dB del haz de sonido para dibujar la extensión longitudinal y vertical del reflector. En Alemania, Krautkramer desarrolló el sistema DGS (distance gain amplitude) con el que comparar la amplitud del reflector con la de reflectores circulares con diámetro conocido a profundidades predeterminadas para transductores también predeterminados. En Estados Unidos, por su parte, la tendencia fue a comparar y reportar las señales contra una curva DAC (distance amplitude correction) para generar una norma común reproducible.

En la década de los 60 Whitford desarrolló un sistema de dimensionamiento alternativo al sistema de caída de intensidad, al cual él mismo denominó sistema de "máxima amplitud", en el que el último máximo, en la definición de los límites del reflector, era el eco final de la onda transversal difractada. En teoría, esta señal de difracción procura una localización mucho más precisa de los bordes del reflector. Sin embargo, la señal de la onda transversal difractada es débil y, por tanto, difícil para el inspector de ultrasonidos para identificar satisfactoriamente.

Fue finalmente Silk en 1977 el primero que utilizó la técnica del tiempo de vuelo de la difracción (time of flight diffraction, TOFD) para representar los extremos superior e inferior de las discontinuidades de una manera que permitiese una mayor precisión en la medición a través del espesor. Este método emplea transductores angulares de onda longitudinal, ubicados sobre la misma superficie, tanto para transmitir como para recibir el sonido. La onda lateral y las señales difractadas desde las puntas de los reflectores permiten una triangulación precisa de los extremos superior e inferior de los mismos. Los recientes avances en la instrumentación, los cuales han permitido gracias a la tecnología informática el análisis en tiempo real y el análisis de resultados posterior a la inspección, han supuesto un aumento en el número de usuarios empleando esta técnica.

Si los físicos han contribuido en gran medida a la comprensión de la teoría y desarrollado cada vez más y más formas de aplicar los ultrasonidos, los ingenieros no han sido menos productivos en la mejora de la instrumentación durante los últimos 50 años. Los primeros detectores ultrasónicos de defectos utilizaban tubos de vacío (válvulas), necesitaban electricidad, y eran sumamente pesados (ver figura 2.1). Con el empleo de cristales de cuarzo, la amplitud de la señal era pobre y la resolución, de hecho, muy pobre. Después de un tímido comienzo, la tecnología de los semiconductores permitió la aparición de detectores ligeros y fácilmente móviles y transportables, que junto con los materiales de cristal sintético, ofrecen un rendimiento altamente mejorado. La mayor parte de este avance tecnológico ya se había logrado a mediados

de la década de los 70.

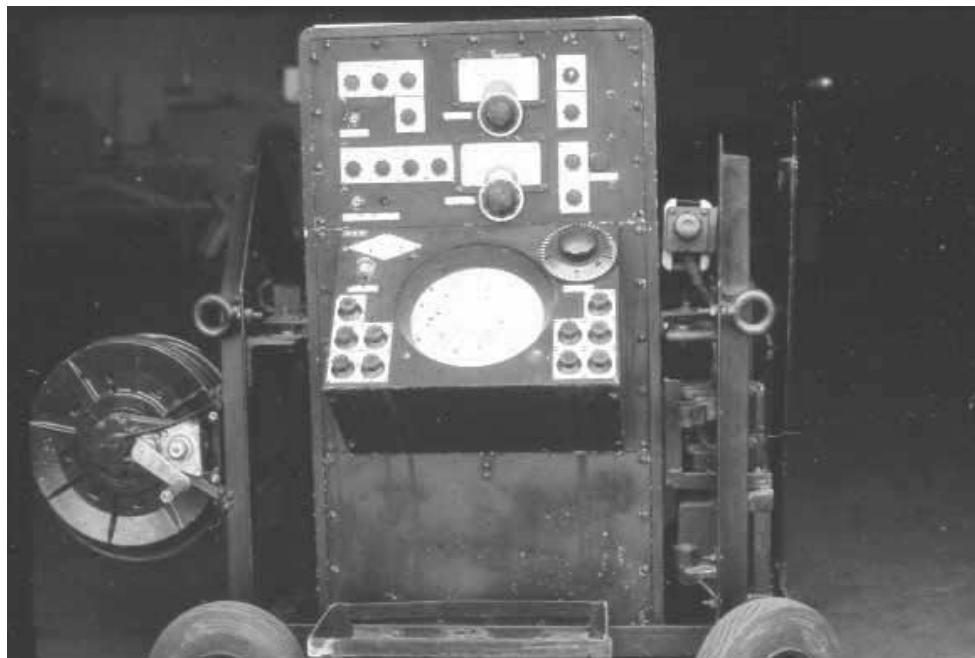


Fig. 2.1: "Supersonic Reflectoscope", uno de los primeros equipos ultrasónicos [23].

Durante los años 80 y 90 se incorporaron microchips en los detectores, permitiendo al operador almacenar parámetros de calibración y trazos de la señal obtenida. Esto, a su vez, permitió el análisis fuera de línea y la reevaluación de los datos en una fecha posterior a la de ejecución del ensayo. La tecnología digital y el uso de paneles de pantalla LCD en lugar de los iniciales tubos de rayos catódicos, CRTs, durante la década de los 90 supusieron todavía una mayor reducción en el tamaño y el peso de los transductores.

2.2 Teoría y Principios fundamentales

2.2.1 Naturaleza de las ondas de sonido

El ultrasonido se rige por las mismas leyes físicas que el resto de los fenómenos acústicos. Asimismo, los conceptos y los términos que se aplican en los ultrasonidos son básicamente los mismos que en la acústica general. Por lo tanto, resulta de utilidad en este capítulo presentar en primer lugar un breve resumen de las ideas y los principios acústicos fundamentales en la medida que revistan importancia para el ultrasonido.

Las ondas de sonido son básicamente vibraciones u oscilaciones de las partículas que componen un sólido, líquido o gas. Como una forma de energía, son, por tanto, un ejemplo de energía

2. Inspección mediante Ultrasonidos

mecánica, y de ello se deduce que, al tener que haber *algo* que vibre, no puede existir sonido en el vacío.

El único sentido humano que puede detectar las ondas de sonido es el oído, y este sentido está limitado a un rango relativamente estrecho de frecuencias de vibración, denominado *rango audible* (ver figura 2.2). Ello implica pues que existen frecuencias de vibración por debajo y por encima de este rango que no pueden ser detectadas por el oído humano.

Los sonidos por debajo de aproximadamente 16 Hz están por debajo del límite de la audición humana y se llaman *vibraciones subsónicas*. Los sonidos por encima de aproximadamente 20.000 Hz son demasiado altos para ser detectados y se les denomina *vibraciones ultrasónicas*. Entre esos dos valores, en el rango audible, es más común utilizar el término tono para referirse a la frecuencia.

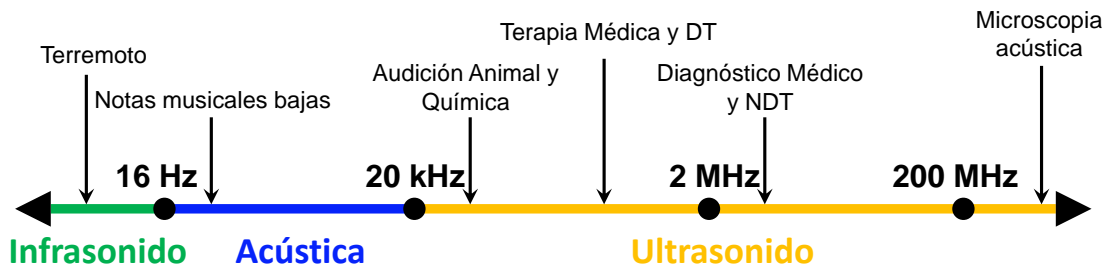


Fig. 2.2: Rangos audible, subsónico y ultrasónico del sonido [20].

2.2.2 Vibración del sonido

Las ondas de sonido son oscilaciones o vibraciones mecánicas en el tiempo y en el espacio que ocurren en los cuerpos materiales extensos. Es decir, son un tipo de movimiento periódico en el cual el cuerpo o la partícula sometida a vibración está experimentando un cambio repetitivo de posición en el tiempo. De esta forma, las partículas que componen ese cuerpo, son perturbadas de sus posiciones de reposo o equilibrio y están sujetas a las vibraciones a su alrededor de acuerdo a ciertas leyes. Un ejemplo de vibración es un péndulo que oscila hacia atrás y adelante a un ritmo o frecuencia constante.

Para estudiar los requisitos esenciales de una vibración, consideremos la figura 2.3. Un cuerpo con una masa determinada, W , está suspendido de una viga por medio de un resorte. En reposo, dos fuerzas iguales y opuestas actúan sobre la masa: la gravedad, G , que actúa hacia abajo, se opone a la tensión, T , en el muelle. El cuerpo se dice que está en estado de equilibrio. Si se levanta el peso, aflojando la tensión del muelle, y luego se libera, la gravedad trata de restaurar al cuerpo a su posición original. Si, por el contrario, se tira del cuerpo hacia abajo, la tensión en el resorte aumenta y cuando se libera el peso, esta tensión extra en el muelle trata de restaurar al

cuerpo una vez más a su posición original de equilibrio. Este comportamiento es típico de todo movimiento periódico.

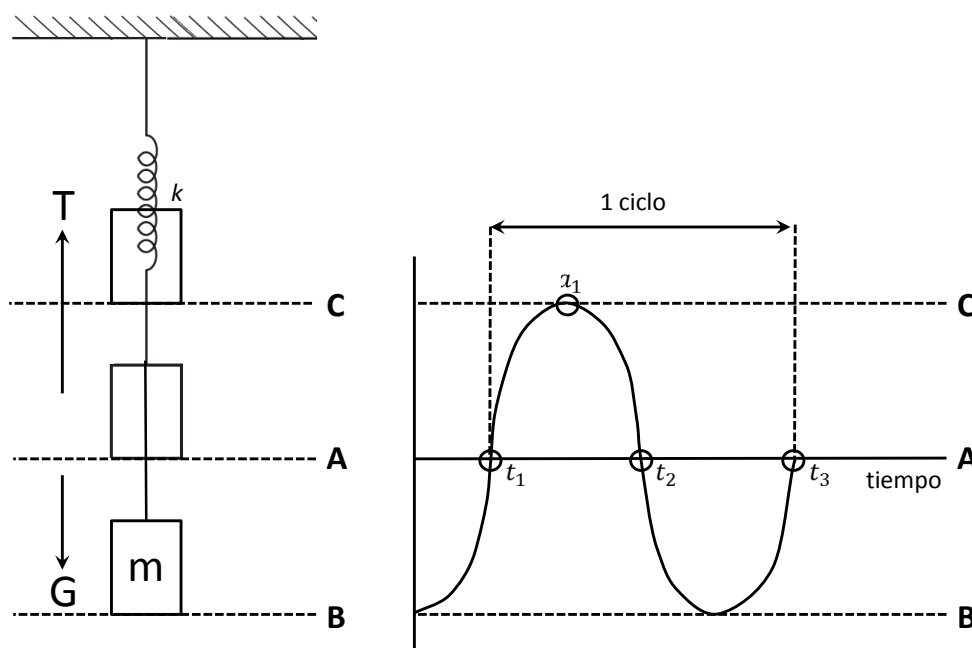


Fig. 2.3: Masa extendida de un muelle (oscilador masa-muelle) y ciclo de oscilación [23,28].

Esta simple disposición que acabamos de describir proporciona todo lo necesario para sostener una vibración. En primer lugar, tiene que existir algo (el cuerpo, la masa) para mover, y en segundo lugar, debe existir también una fuerza interna restauradora que trate de contrarrestar ese movimiento o desplazamiento (en este caso, la gravedad y la tensión del muelle).

Para ondas de sonido en sólidos, líquidos y gases, los cuerpos vibrantes son las partículas que componen la sustancia, y las fuerzas de recuperación, los enlaces elásticos y electrostáticos que sostienen la sustancia cohesionada. Las partículas se pueden suponer unidas entre sí por medio de una serie de resortes, tal y como se puede ver en la figura 2.4. Si una partícula se mueve hacia su vecina, el resorte entre ambas se aplasta y tiende a empujar al invasor de vuelta a su lugar de origen. Del mismo modo, si se aleja de su vecina, el resorte se estira y tiende a tirar de la partícula hacia su punto origen.

El sonido audible es un ejemplo de modo de vibración denominada *onda de compresión*, la cual viaja desde la fuente emisora a través de una sucesión de maniobras de una partícula a la siguiente. Cada partícula vibra a la frecuencia del sonido, oscilando hacia un lado y otro la distancia correspondiente a la amplitud o el volumen del sonido. Cuando vibra cada una de las partículas, reduce la tensión del resorte que la enlaza con la partícula contigua y comienza así la oscilación de esta segunda partícula. Como la oscilación pasa de una partícula a la siguiente, y de ésta a la siguiente, y así sucesivamente, se dice que la onda de sonido viaja o se *propaga* a

2. Inspección mediante Ultrasonidos

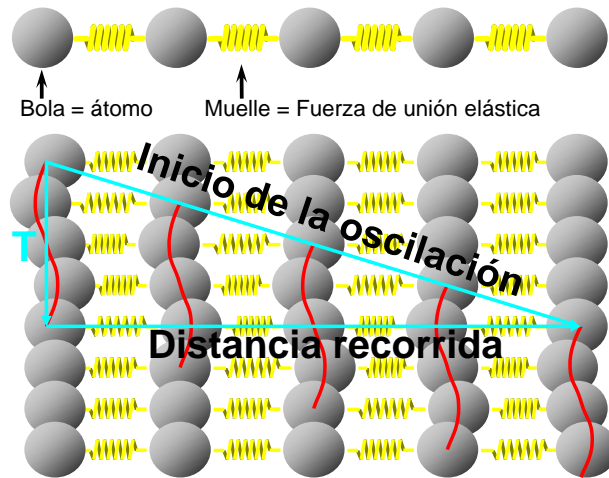


Fig. 2.4: Vista esquemática de la propagación de una onda en un medio [24].

través del material. Cabe destacar una vez más que las partículas individuales no migran a otro lugar, sino que oscilan alrededor de una posición media de reposo o equilibrio.

La esencia del sonido reside pues en que los movimientos oscilatorios se propagan en el medio. Ello implica que aunque las partículas adyacentes entre sí realicen oscilaciones muy similares o incluso iguales, estos movimientos se retrasan uno con respecto del otro de tal manera que cada fase o estado de la oscilación se propaga dentro del medio con una cierta velocidad.

2.2.3 Modos de propagación

El tipo o modo de propagación de las ondas de sonido descrito en la sección anterior (onda de compresión) puede darse en sólidos, líquidos y/o gases. Existen también otros modos de vibración, pero sólo en sólidos.

Para gases y líquidos es suficiente con caracterizar las fuerzas internas por medio de una única cantidad, séase, la presión omnidireccional direccionada perpendicularmente sobre cada límite o frontera del cuerpo. En cambio, en los sólidos es diferente. En contraste con los fluidos, los sólidos tienen la tendencia no sólo a mantener su volumen constante, sino también su forma. Por tanto, los cambios de densidad y de forma de un objeto sólido sólo pueden producirse si se ejercen las fuerzas adecuadas sobre el mismo. Y, ello implica a su vez, que sobre una superficie sólida libre, aparecen fuerzas tanto en la dirección de la normal (fuerzas de compresión) como en la tangencial (fuerzas de cizalladura). Obviamente las interacciones son más complicadas en un sólido que en un fluido. De ahí la mayor variedad de tipos de onda mecánica que se producen en los sólidos.

Las diversas formas en las que puede propagarse el sonido a través de un medio se describen

generalmente en función de la dirección del movimiento de las partículas de dicho medio en relación a la dirección en la que viaja la onda de sonido. De este modo, las *ondas de compresión* pueden definirse como aquellas ondas en las que el movimiento de las partículas se produce longitudinalmente, esto es, en el mismo plano o dirección que la dirección de propagación (ver 2.5).

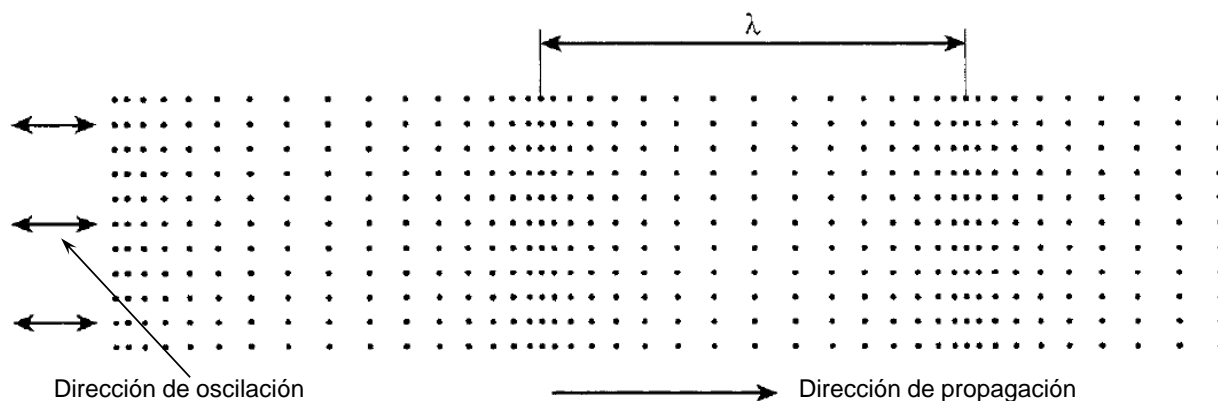


Fig. 2.5: Movimiento de las partículas responsables de la propagación de una onda longitudinal o de compresión [45].

Los tres estados de agregación de la materia por definición poseen en mayor o menor medida fuerzas que unen y mantienen unidas a las partículas entre sí, contrarrestando a las fuerzas activas de compresión y/o dilatación. En los sólidos, este fenómeno es proporcionado por el módulo de elasticidad, conocido también como *módulo de Young*. La presión de un gas confinado en un volumen, al verse este último reducido, aumenta en contraposición a la fuerza de compresión, mientras que la presión cae si, por el contrario, aumenta el volumen, con el vacío parcial como fuerza restauradora.

Los sólidos, tal y como acabamos de mencionar, a diferencia de líquidos y gases, también poseen rigidez, esto es, resistencia a las cargas de cizallamiento. El nombre para esta resistencia a las fuerzas de cizalladura en sólidos se denomina *módulo de rigidez*, y permite al sonido propagarse en un modo diferente bajo ciertas circunstancias. Este nuevo modo de propagación se conoce como *onda de corte*, y se define como aquella onda cuya dirección de propagación es perpendicular o en ángulo recto al desplazamiento de las partículas (ver 2.6). Las ondas de corte son débiles en comparación con las ondas de compresión. De hecho, las ondas de corte son generadas normalmente en el medio empleando parte de la energía de las ondas de compresión.

Si una onda de corte es configurada de forma que sólo se propague a ras de la superficie de un sólido relativamente grueso, sin que apenas penetre en él, únicamente hasta una profundidad igual a una longitud de onda, dicha onda vuelve a cambiar al primer modo. Esto provoca en el contorno del material un movimiento característico muy peculiar de las partículas, resultado de combinar los movimientos longitudinal y transversal simultáneamente. Esta onda periférica se denomina *onda de superficie* y se define como aquella onda en la que el movimiento de las

2. Inspección mediante Ultrasonidos

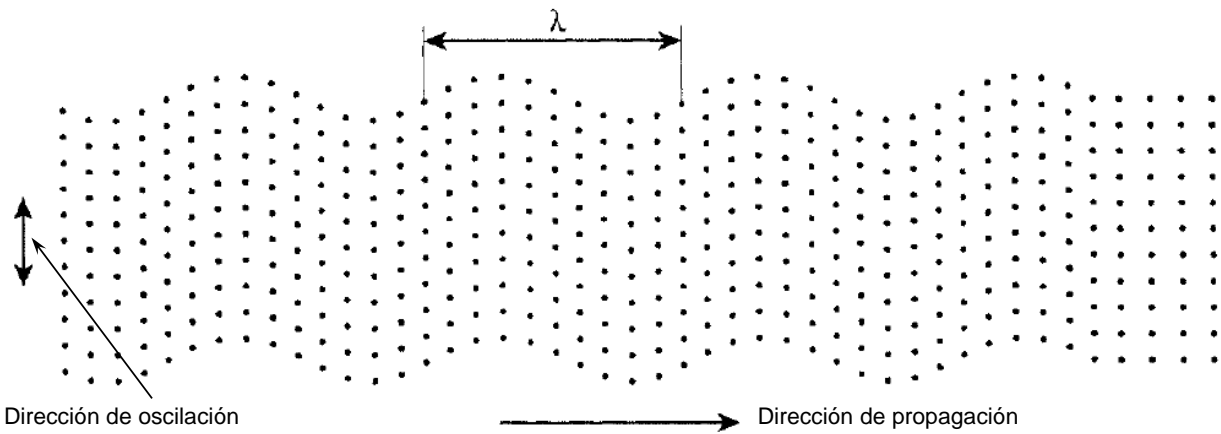


Fig. 2.6: Movimiento de las partículas responsables de la propagación de una onda transversal o de corte [45].

partículas es elíptico, con el eje mayor de la elipse perpendicular a la dirección de propagación de dicha onda, es decir, perpendicular a la superficie del sólido (ver 2.7).

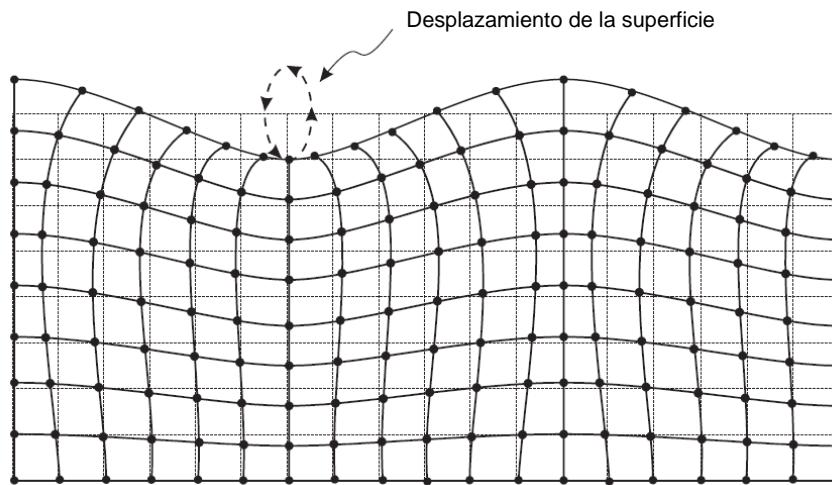


Fig. 2.7: Movimiento de las partículas responsables de la propagación de una onda superficial o de Rayleigh [27].

Las ondas superficiales se generan cuando una onda de corte alcanza e interseca la superficie con un ángulo próximo al segundo ángulo crítico (ver sección 2.2.4.6). Se trata de ondas muy ventajosas puesto que son muy sensibles a los defectos superficiales, así como a cualquier otra característica superficial, y son capaces de propagarse en superficies curvas. Por todo ello, las ondas superficiales pueden emplearse para inspeccionar áreas donde otro tipo de ondas tendrían dificultad para llegar.

Las *ondas de Lamb*, como las ondas de superficie, se propagan paralelas a la superficie del

material e infunden un movimiento elíptico a las partículas en todo su espesor. Se producen cuando el material posee un espesor de unas pocas longitudes de onda a la frecuencia de muestreo y es uniforme o constante a lo largo del medio. En otras palabras, son las ondas que se dan en chapas, láminas, tubos y/o alambres (ver 2.8).

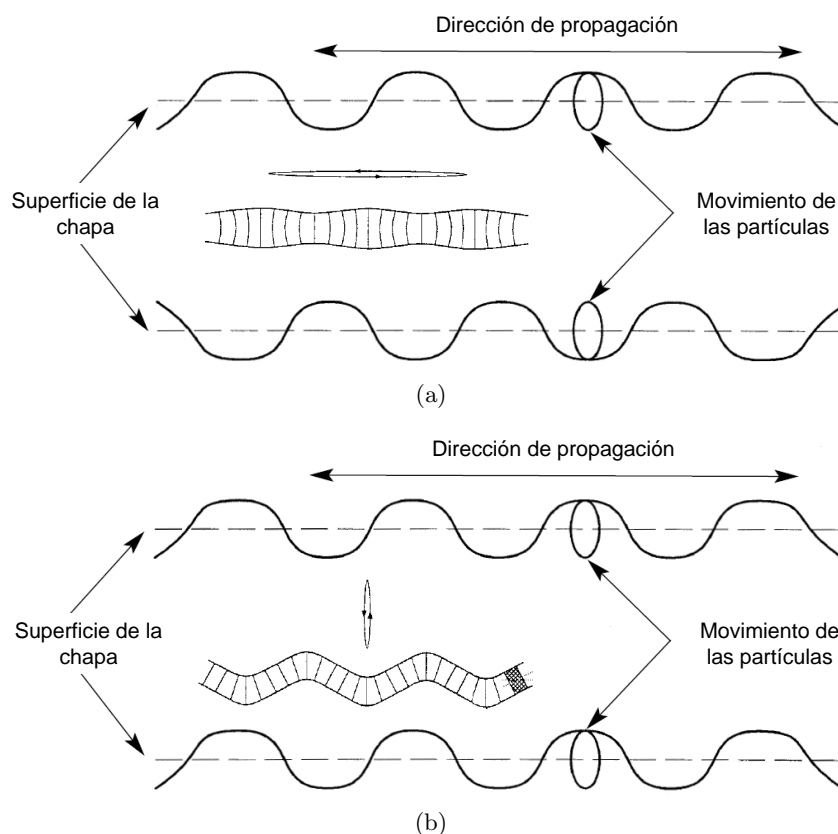


Fig. 2.8: Movimiento de las partículas responsables de la propagación de una onda de Lamb (a) simétrica, donde las crestas de la onda en las dos superficies próxima y lejana coinciden, y (b), asimétrica, donde el pico de la onda en una superficie coincide con un valle en la otra superficie [20, 23].

Se trata de ondas con un complejo modo vibratorio cuya propagación depende de la densidad y de las propiedades elásticas del material. De cualquier forma, también dependen muy activamente de la frecuencia y del propio espesor del medio, tal y como hemos visto en el párrafo anterior. Este tipo de onda es generada a un ángulo de incidencia en el que la componente paralela de la velocidad de la onda en la fuente o transductor es igual a la velocidad de la onda en el material. Cuando son aplicadas en acero, pueden viajar durante varios metros.

Por último, existe un tipo especial de onda de compresión que viaja a ras de la superficie como una onda superficial y que se denomina *onda lateral*. Se trata de un tipo de onda muy útil en la aplicación de técnicas TOFD.

Los cuatro modos principales de propagación son la onda de compresión, la onda de corte, la

2. Inspección mediante Ultrasonidos

onda superficial y la onda de Lamb. No obstante, las ondas de corte y de compresión constituyen los dos modos de propagación más ampliamente utilizados en la inspección por ultrasonidos. Cada una de las ondas recibe un nombre alternativo que se emplea indistintamente. Dichas nomenclaturas son:

- Ondas de compresión: ondas longitudinales o de presión.
- Ondas de corte: ondas transversales.
- Ondas de superficie: ondas de Rayleigh.
- Ondas de Lamb: ondas de chapa.

La tabla 2.1 resume varios, aunque no todos, de los modos posibles de propagación de las ondas de sonido en un sólido:

Tipos de onda en sólidos	Vibración de partículas
Longitudinal - de compresión	Paralela a la dirección de la onda
Transversal - de corte	Perpendicular a la dirección de la onda
Superficial - Rayleigh	Órbita elíptica - modo simétrico
Ondas de chapa - Lamb	Componente perpendicular a la superficie (onda extensional)
Ondas de chapa - Love	Paralela a la chapa, perpendicular a la dirección de la onda
Stoneley - onda de Rayleigh permeable	Onda guiada a lo largo de la interfaz
Sezawa	Modo antisimétrico

Tabla 2.1: Modos de propagación de las ondas de sonido en un sólido [28].

2.2.4 Propiedades de las ondas ultrasónicas

2.2.4.1 Velocidad

El sonido se transmite a diferentes velocidades a través de diferentes materiales: se propaga más rápido en líquidos que en gases y más rápido en sólidos que en líquidos. A su vez, el sonido viaja a diferentes velocidades a través de distintos metales. Por tanto, existe una velocidad de sonido característica para cada material. En ultrasonidos, a esta velocidad se le conoce como velocidad del sonido para ese determinado material. En las tablas 2.2 y 2.3 se resumen las distintas velocidades del sonido, densidad e impedancias acústicas para diversos materiales líquidos y sólidos respectivamente. Siendo esto así, a continuación se ahondará en las razones o causas por las cuales tiene lugar esta diferencia de velocidades.

2.2. Teoría y Principios fundamentales

Líquido	V_L (km/s)	ρ (10^3kg/m^3)	Z_0 (MRayls)
Acetona	1.17	0.79	1.07
Argón líquido (87 K)	0.84	1.43	1.20
Metanol	1.10	0.79	0.87
Galio (30 K)	2.87	6.10	17.50
Glicerina	1.92	1.26	2.50
He^4 líquido (2 K)	0.228	0.145	0.033
Mercurio	1.45	13.53	19.60
Nitrógeno líquido (77 K)	0.86	0.85	0.68
Aceite de silicona	1.35	1.10	1.50
Agua de mar	1.53	1.02	1.57
Agua (20°C)	1.48	1.00	1.483

Tabla 2.2: Velocidad de propagación del sonido, densidad e impedancia acústica para distintos materiales líquidos [20].

Sólido	V_L (km/s)	V_S (km/s)	ρ (10^3kg/m^3)	Z_L (MRayls)	Z_S (MRayls)
Epoxi	2.70	1.15	1.21	3.25	1.39
Caucho RTV-11	1.05	-	1.18	1.24	-
Metacrilato PMMA	2.70	1.10	1.15	3.10	1.25
Vidrio de borosilicato (Pyrex)	5.65	3.28	2.25	13.10	7.62
Aluminio	6.42	3.04	2.70	17.33	8.21
Latón	4.70	2.10	8.64	40.60	18.15
Cobre	5.01	2.27	8.93	44.60	18.15
Oro	3.24	1.20	19.70	63.80	23.60
Plomo	2.16	0.70	24.60	7.83	0.44
Cuarzo	5.96	3.75	2.20	-	-
Niobato de litio	7.33	-	4.70	34.00	-
Óxido de zinc	6.33	-	5.68	36.00	-
Acero	5.92	3.20	7.90	46.00	24.90
Berilio	12.90	8.90	1.87	24.10	16.60
Zafiro	11.10	6.04	4.00	44.40	24.20

Tabla 2.3: Velocidad de propagación del sonido, densidad e impedancia acústica para distintos materiales sólidos [20].

Factores que influyen en la velocidad

Los dos factores principales que afectan a la velocidad son la *densidad* y la *elasticidad* del material. Por un lado, materiales con un elevado valor para el módulo de Young poseen también

2. Inspección mediante Ultrasonidos

una velocidad de sonido alta, como es el caso, por ejemplo, del acero en comparación con el plomo o el aire. Por otro lado, cuanto mayor sea la densidad de un material, menor es la velocidad del sonido a través del mismo. En este sentido, por ejemplo, el plomo tiene una velocidad inferior a la del acero.

La densidad y la elasticidad son los factores dominantes que afectan a la velocidad, pero existe otro parámetro que desempeña un papel relativamente menor, pero no por ello menos significativo: el *coeficiente de Poisson*. Es fácil comprobar que cuando se estira una banda elástica, al mismo tiempo se hace más delgada. Cuanto más se estira, más se estrecha. El coeficiente de Poisson relaciona el adelgazamiento o estrechamiento al estiramiento y se calcula como el coeficiente entre los cambios en el diámetro y la longitud de la banda elástica.

La velocidad de la onda de compresión o longitudinal para un material dado puede calcularse a partir de la ecuación:

$$V_c = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1 - \sigma}{(1 + \sigma)(1 + 2\sigma)}} \quad (2.1)$$

donde:

- V_c Velocidad de la onda longitudinal
- E Módulo de Young de elasticidad
- ρ Densidad del material
- σ Coeficiente de Poisson

Las ondas transversales, como ya sabemos, sólo pueden tener lugar en sólidos y no se propagan a la misma velocidad que la onda longitudinal correspondiente para un material dado. Esto es debido a que el módulo de rigidez, en detrimento del módulo de Young, es el que dictamina el valor de la velocidad, y el módulo de rigidez es siempre menor que el módulo de elasticidad. Esto significa que la velocidad de la onda transversal es siempre menor que la velocidad de la onda longitudinal para un mismo material. Como regla general, la velocidad de la onda transversal es aproximadamente la mitad de la velocidad de la onda longitudinal. La velocidad se puede calcular a partir de:

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1 + \sigma)}} \quad \text{o alternativamente} \quad V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.2)$$

donde:

Las ondas de Rayleigh o de superficie también tienen su propia velocidad, cuyo valor se toma de forma generalizada como aproximadamente el 90% de la velocidad de la onda transversal (entre el 87% y el 95%).

V_s	Velocidad de la onda transversal
G	Módulo de rigidez
ρ	Densidad del material
σ	Coefficiente de Poisson

Aunque la velocidad para cada uno de estos modos de propagación se puede calcular, se requiere un conocimiento preciso de todas las variables, y éstas no son conocidas en la mayoría de los casos. Factores tales como la densidad y la fuerza varían con la aleación, el tratamiento térmico y los procesos de fundición, laminación y forja, por lo que resulta sumamente complicado saber si se están utilizando los valores correctos. En cambio, es más usual llevar a cabo una rutina de calibración durante el procedimiento de configuración del equipo para realizar una inspección ultrasónica.

2.2.4.2 Longitud de onda

Al tiempo que las partículas están completando cada ciclo de su vibración, la onda de sonido se está moviendo en la dirección de propagación a la velocidad característica de ese material. De ello se deduce que durante el tiempo requerido para completar un ciclo de vibración, la onda de sonido se moverá una cierta distancia dependiendo de la velocidad en ese material. Esta distancia para un material y una frecuencia de vibración dados, es lo que se conoce como *longitud de onda*:

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad (2.3)$$

donde:

λ	Longitud de onda
V	Velocidad
f	Frecuencia

La longitud de onda se convierte de muchas maneras en un elemento fundamental a la hora de detectar defectos mediante ultrasonidos. En primer lugar, el reflector más pequeño que puede ser detectado debe tener una dimensión principal de al menos la mitad de la longitud de onda a la frecuencia de muestreo. Si el tamaño crítico de la discontinuidad que debe ser detectada es sabido, este conocimiento ayuda a la selección de una frecuencia apropiada. La longitud de onda también se utiliza en el cálculo de la forma del haz del sonido y la distancia del campo próximo en dicho haz. La importancia de estos elementos se discutirá más adelante en las secciones [2.2.4.7](#) y [2.2.4.7](#) respectivamente.

2. Inspección mediante Ultrasonidos

2.2.4.3 Reflexión

El límite o la frontera entre dos medios, como pueden ser el acero y el aire en las dos caras de una chapa, se denomina *interfase*. En una interfase, una parte del sonido se transmite al siguiente medio mientras que la parte restante se refleja de vuelta hacia al primer medio. Las proporciones de sonido que se reflejan y/o transmiten dependen de las propiedades de los materiales a cada lado de la interfase.

La densidad y la elasticidad de los dos medios vuelven a ser una vez más los factores que determinan las cantidades de energía reflejada y transmitida en la interfase. Cada material posee un factor que se utiliza para calcular la reflexión en una interfase. Este factor se denomina impedancia acústica y resulta de multiplicar la densidad por la velocidad para ese material en concreto. Expresado matemáticamente:

$$Z = \rho \cdot V \quad (2.4)$$

donde:

- Z Impedancia acústica
- ρ Densidad del material
- V Velocidad del material

Para calcular el porcentaje de la energía reflejada en una interfase entre dos materiales, se utiliza la siguiente fórmula:

$$\text{Energía reflejada} = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \cdot 100\% \quad (2.5)$$

donde Z_1 y Z_2 son la impedancia acústica de los materiales a cada lado de la interfase.

En el caso de una interfase acero-aire, casi toda la energía se refleja y prácticamente nada entra en el aire, debido a las grandes diferencias de densidad y de elasticidad entre los dos medios. En cambio, si el acero se sitúa bajo el agua, de modo que tenemos una interfase acero-agua, el 88% de la energía se refleja y el 12% se transmite aproximadamente dentro del agua.

Cuando un haz de sonido que viaja a través de una pieza metálica se encuentra con una discontinuidad como una grieta, una laminación, un poro o una inclusión no metálica, existe una interfase. En un lado se encuentra el metal y en el otro, la discontinuidad. En esta interfase, por tanto, parte de la energía se reflejará y parte se transmitirá. Si el lado de la discontinuidad de la interfase es aire, entonces la reflexión es total. Pero incluso para una inclusión metálica, la mayor

parte de la energía se verá reflejada. Esta propiedad de las ondas sonoras permite la detección de discontinuidades en los materiales.

2.2.4.4 Medio de acoplamiento

La propiedad de la reflexión también presenta cierta dificultad en el sentido de que si un transductor ultrasónico se coloca simplemente sobre la parte a ser evaluada, existirá siempre entre ambas superficies un espacio o hueco con aire, por muy pequeño que éste sea. Pero, como acabamos de ver, en una interfase sólido-aire, la reflexión es del 100%, por lo que el sonido vuelve directamente al transductor sin penetrar en el material. Para superar este problema, debe de excluirse el aire utilizando un medio que enlace la impedancia acústica del transductor con el metal. Como este medio debe también permitir que el palpador pueda ser desplazado sobre la superficie del metal con el objeto de escanear toda su área, tiene que ser un líquido, una grasa o una pasta. Dicha sustancia con tales características es lo que se conoce como *medio de acoplamiento*.

Existen muchas sustancias que se pueden utilizar como acopladores, siendo los principales criterios en su elección ofrecer el mejor ajuste o acople posible e impedir cualquier reacción química adversa entre el acoplador y el metal. La mayoría de estos medios sólo permiten un acople limitado debido a que los líquidos en general poseen una impedancia acústica baja. La mayor parte de ellos permiten al sonido transmitirse apenas entre un 10% y un 15%, siendo el mejor de ellos la glicerina con una transmisión en torno al 15%. Los medios de acoplamiento más utilizados comúnmente son:

- Agua.
- Queroseno.
- Aceite.
- Grasa.
- Glicerina.
- Geles y/o pastas especiales diseñadas para tal propósito.

2.2.4.5 Refracción

Hasta ahora hemos supuesto todo el tiempo que el sonido se enfrenta o se introduce en el material formando un ángulo recto con éste, es decir, perpendicular a su superficie. En cambio, el sonido puede ser introducido a un determinado ángulo, denominado *ángulo de incidencia*.

2. Inspección mediante Ultrasonidos

La figura 2.9 muestra un haz de sonido que viaja hacia una interfase entre dos medios formando un ángulo i con la perpendicular o normal (ángulo de incidencia). La velocidad del sonido en el medio 1 es V_1 y en el medio 2, al otro lado de la interfase, V_2 .

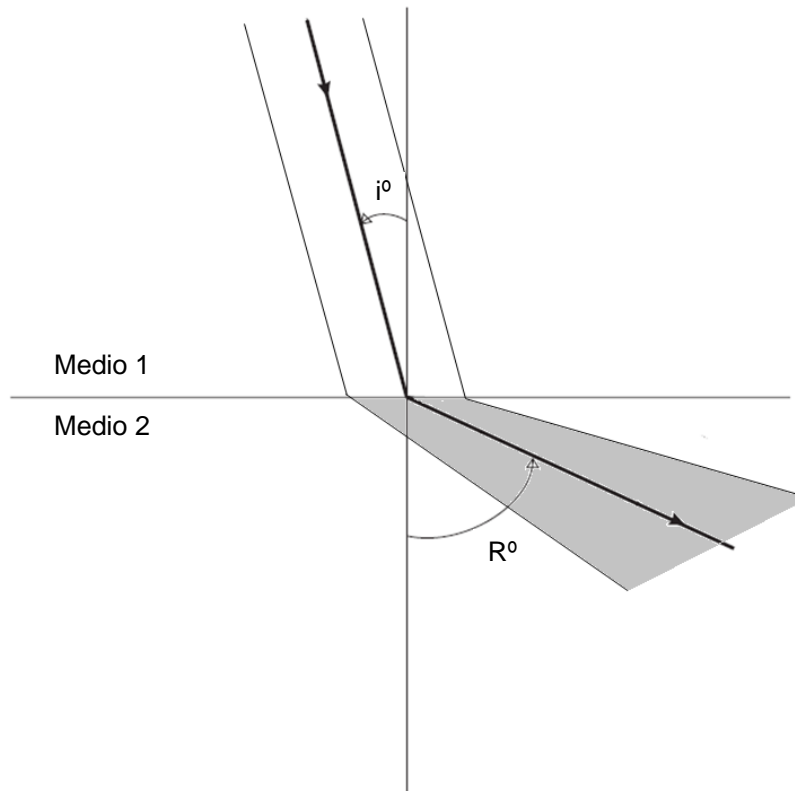


Fig. 2.9: Refracción [23].

Supongamos para este ejemplo que V_1 es menor que V_2 , como sería el caso en el que el medio 1 fuese agua y el medio 2, acero. A medida que el haz se desplaza hacia la interfase, todo él se mueve a la misma velocidad hasta que el extremo izquierdo toca en primer lugar la interfase. En el momento en que este extremo del haz alcanza al medio 2, éste se acelera. Pero el sonido en el medio 1 aún permanece a la velocidad antigua V_1 . Gradualmente, al ir alcanzando todo el frente de onda la frontera entre ambos medios, ésta se acelera hasta que por último el extremo derecho pasa a través de la interfase y el total del haz se extiende a través del segundo medio a la nueva velocidad V_2 .

Durante esta transición, el haz vira en la interfase formando un nuevo ángulo R en el medio 2 denominado *ángulo de refracción*. La razón de esta refracción es la diferencia de velocidad a ambos lados de la interfase. La *ley de Snell* permite determinar el nuevo ángulo si son conocidas las dos velocidades y el ángulo de incidencia. Dicha ley establece que el cociente entre el seno del ángulo de incidencia y la velocidad en el medio 1 es igual al cociente entre el seno del ángulo de

refracción y la velocidad en el medio 2:

$$\frac{\sin i}{V_1} = \frac{\sin R}{V_2} \quad \text{o alternativamente} \quad (2.6)$$

$$n_1 \cdot \sin i = n_2 \cdot \sin R \quad \text{con} \quad n_j = \frac{c}{V_j} \quad (2.7)$$

donde:

$\sin i$	Seno del ángulo de incidencia
$\sin R$	Seno del ángulo de refracción
V_1	Velocidad en el medio 1
V_2	Velocidad en el medio 2
n_1	Índice de refracción en el medio 1
n_2	Índice de refracción en el medio 2
c	Velocidad de la luz en el vacío

La refracción hace referencia a la porción de la energía del sonido transmitida en la interfase. La proporción de energía reflejada es la misma que antes, pero la energía reflejada abandona la interfase con un ángulo de reflexión r igual al ángulo de incidencia i , tal y como se muestra en la figura 2.10.

2.2.4.6 Conversión de modo de propagación

A medida que se introduce el haz de sonido en un sólido con un ángulo de incidencia, empieza simultáneamente a surgir otro fenómeno denominado *conversión de modo*. A pesar de que el haz incidente es una onda longitudinal o de presión, a medida que el sonido atraviesa la interfase, comienza a desarrollarse también en el sólido una onda transversal refractada, además de la propia onda de compresión refractada. Para valores pequeños del ángulo de incidencia, la amplitud de la onda transversal es pequeña y puede despreciarse, pero, a medida que el ángulo de incidencia aumenta, también lo hace la amplitud de dicha onda de corte. Llegados a un determinado punto, las amplitudes de la onda transversal y de la onda longitudinal adquieren aproximadamente el mismo valor. La ley de Snell, como hemos visto en el apartado anterior, estipula que los dos modos no se refractan con el mismo ángulo puesto que la velocidad de la onda transversal es menor que la de la onda longitudinal.

La afirmación anterior supone un problema para la detección de defectos mediante ultrasonidos puesto que confirma la existencia de dos haces propagándose a distintas velocidades y en diferentes direcciones. Éste fue un verdadero problema para los primeros investigadores hasta que Sproule dio con una solución en 1947. Lo que hizo fue simplemente deshacerse de uno

2. Inspección mediante Ultrasonidos

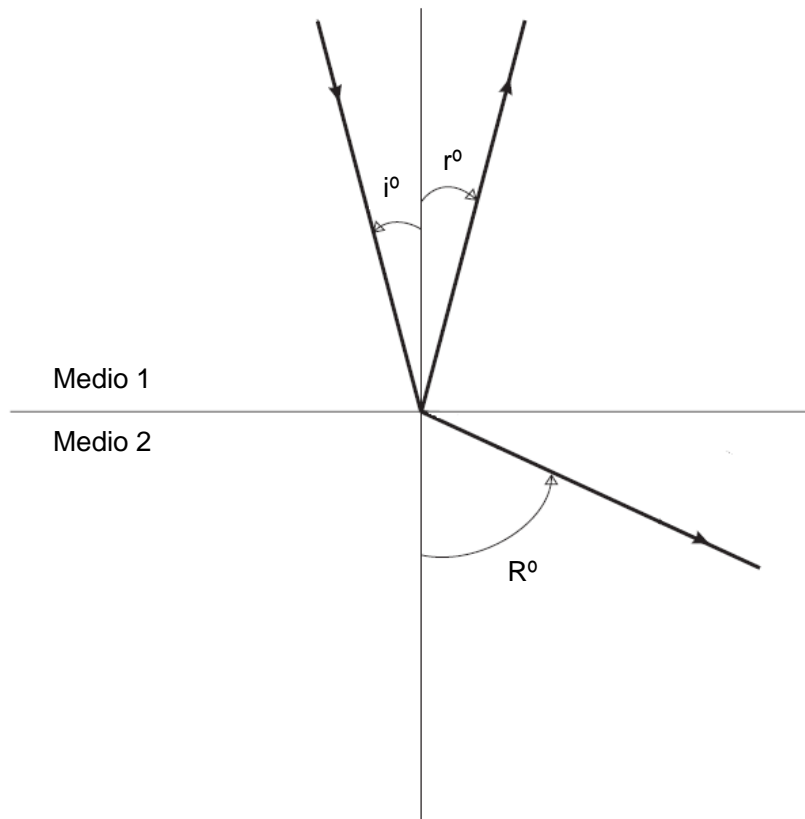


Fig. 2.10: Ley de Snell [23].

de los dos haces. Lo realizó incrementando el ángulo de incidencia hasta que la onda longitudinal refractada, valga la redundancia, se refractaba a 90° . Cualquier aumento posterior en el ángulo de incidencia, dejaría sólo una onda transversal refractada en el "medio 2". La onda longitudinal se dice entonces que ha experimentado una reflexión interna total en el medio 1.

Al ángulo de incidencia para el cual el ángulo refractado de la onda longitudinal es 90° se denomina *primer ángulo crítico*. Por encima del primer ángulo crítico de incidencia, sólo se mantiene en el segundo medio una onda transversal. Mediante la elección adecuada de un ángulo de incidencia por encima del primer ángulo crítico, puede lograrse cualquier haz de ondas transversales de ángulo deseado.

Si el ángulo de incidencia se incrementa todavía más por encima del primer ángulo crítico, llegará un punto en que la onda transversal refractada también se refracte a 90° . El ángulo de incidencia para el cual sucede lo anterior se denomina *segundo ángulo crítico*. En el segundo ángulo crítico, la onda transversal advierte otra conversión de modo. Esta vez se transforma en una onda de superficie o de Rayleigh. Cualquier aumento en el ángulo de incidencia más allá del segundo ángulo crítico no deja ningún tipo de sonido en el medio 2: existe una reflexión interna total en el medio 1. En la figura 2.11(a) puede apreciarse el ángulo de refracción

para el acero obtenido mediante el aumento sucesivo del ángulo de incidencia en una interfase metacrilato- acero, y en 2.11(b), la misma situación pero para una interfase agua-acero.

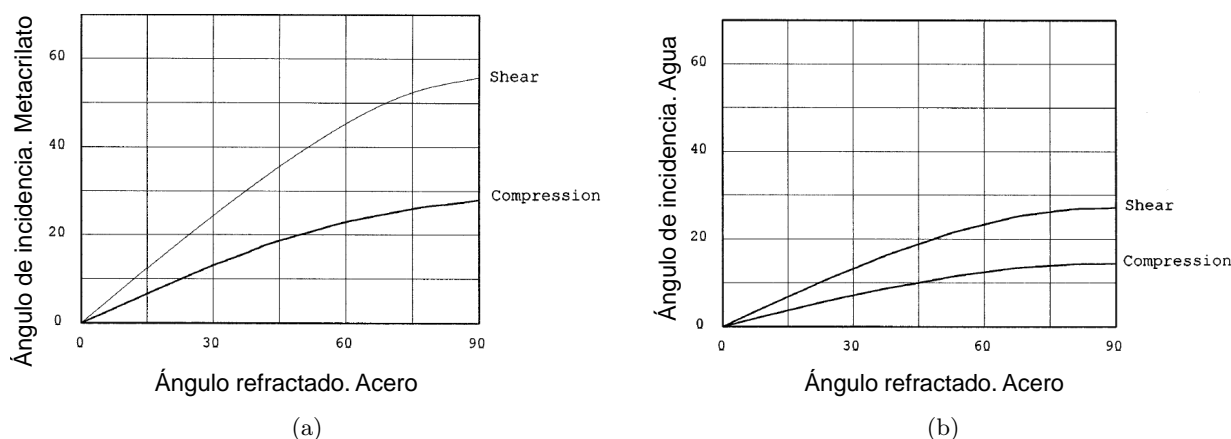


Fig. 2.11: Ángulo de refracción en el acero para las interfases (a) metacrilato-acero y (b) agua-acero [23].

Conversión de modo. Haz reflejado

Las conversiones de modo también tienen lugar en el interior de un sólido (no sólo en la superficie, como hemos visto hasta ahora) cuando un haz ultrasónico encuentra un reflector con un ángulo de incidencia otro que no sea en la dirección de la normal. En la figura 2.12 se puede observar una onda de compresión, C , alcanzando una interfase acero-aire con un ángulo de incidencia i respecto a la normal. La onda longitudinal reflejada, C_r , forma un ángulo reflejado r igual al ángulo de incidencia i . Sin embargo, también aparece una onda transversal, S , resultado de la conversión de modo, con un ángulo s derivado de la ley de Snell. En las aplicaciones donde se emplean ultrasonidos, esta conversión de modo puede generar confusión, dependiendo de las amplitudes relativas de la onda longitudinal reflejada, C_r , y de la onda transversal convertida, S .

La figura 2.13 muestra las amplitudes relativas de la onda longitudinal reflejada y la onda transversal convertida para ángulos de incidencia crecientes de la onda de compresión incidente en una interfase acero-aire. Se puede observar que a valores pequeños del ángulo de incidencia la onda transversal es débil y puede, por tanto, despreciarse. A un ángulo de incidencia de aproximadamente 25° , la onda longitudinal reflejada y la onda transversal poseen la misma amplitud, y a aproximadamente 70° , la onda longitudinal reflejada es muy débil, mientras que la onda transversal se presenta con gran intensidad.

La figura 2.14 por su parte, presenta el ángulo de la onda transversal convertida con respecto a la normal para ángulos de incidencia crecientes de la onda de compresión en una interfase acero-aire. Estos dos gráficos muestran la fuerza o intensidad y la dirección de la conversión de modo. El operador de ultrasonidos puede encontrarse con estas circunstancias cuando lleva a

2. Inspección mediante Ultrasonidos

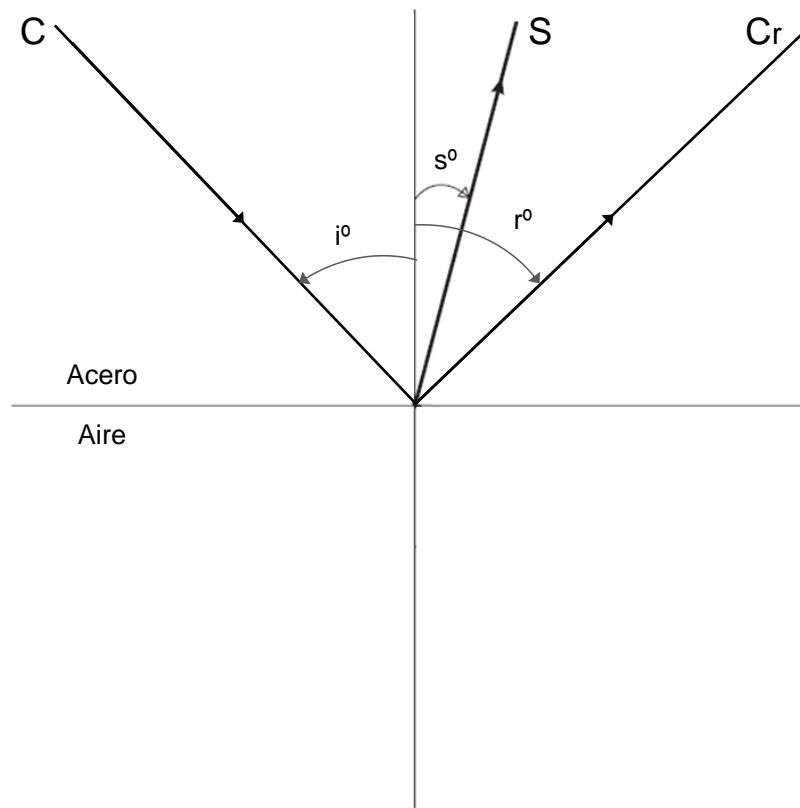


Fig. 2.12: Ángulos de incidencia y reflexión para una onda longitudinal [23].

cabo un análisis con una onda longitudinal (haz recto) si una superficie reflectante no es paralela a la superficie de exploración.

Las conversiones de modo, de la misma forma que ocurren con las ondas longitudinales tal y como acabamos de examinar, también pueden darse cuando una onda transversal se topa con una superficie reflectante, como se muestra en la figura 2.15. En este caso, la onda transversal S se refleja de nuevo con el mismo ángulo que el ángulo de incidencia, S_r , y la onda longitudinal convertida C forma un ángulo α con la normal, el cual se puede calcular análogamente a partir de la ley de Snell.

En la figura 2.16 pueden apreciarse las amplitudes relativas de la onda transversal reflejada y de la onda longitudinal convertida con respecto a la amplitud de la onda transversal incidente, de nuevo para una interfase acero-aire. La figura Relación entre el ángulo de incidencia transversal muestra el ángulo de la onda longitudinal convertida una vez más con respecto al ángulo de incidencia.

Se puede observar a partir del primero de estos dos últimos gráficos que cuando una onda transversal incide sobre una superficie reflectante a aproximadamente 30° , menos del 10% de dicha onda se ve reflejada, mientras que la amplitud de la onda longitudinal convertida crece

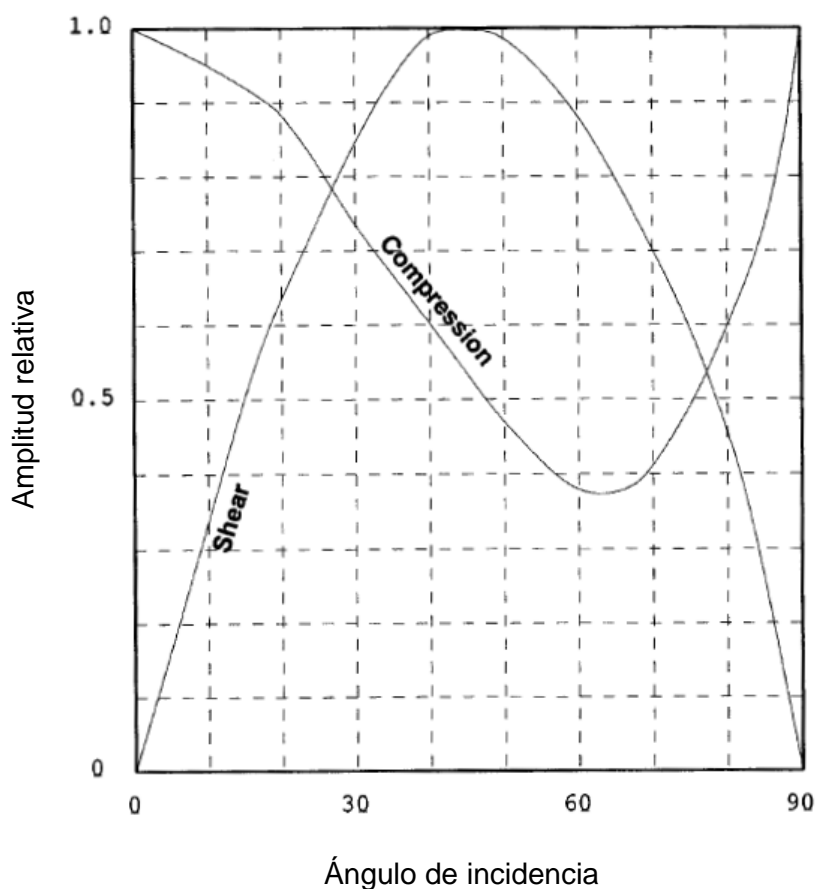


Fig. 2.13: Amplitudes relativas de las ondas longitudinal reflejada y transversal convertida para ángulos de incidencia crecientes de una onda de compresión incidente en una interfase acero-aire [23].

abruptamente, y es mucho mayor que la de la onda transversal reflejada (comparar con figura 2.13). La figura 2.17 determina que para este ángulo de incidencia de la onda transversal (30°), la onda longitudinal convertida estará en un ángulo de aproximadamente 65° respecto a la normal.

2.2.4.7 Características del haz

Hasta ahora se ha tratado al sonido como si fuera un único rayo, cuando en realidad el sonido se propaga como un haz (de rayos). A lo largo del haz, la intensidad o amplitud de la energía sónica varía. Los párrafos que vienen a continuación tratan sobre dichas variaciones así como sobre la forma del haz.

Por conveniencia, el haz se divide en dos zonas distintas denominadas el *campo próximo* o *zona de Fresnel* y el *campo lejano* o *zona de Fraunhofer*. En estos dos campos actúan mecanismos diferentes en relación con la variación de la intensidad del sonido. Atenuación es la palabra

2. Inspección mediante Ultrasonidos

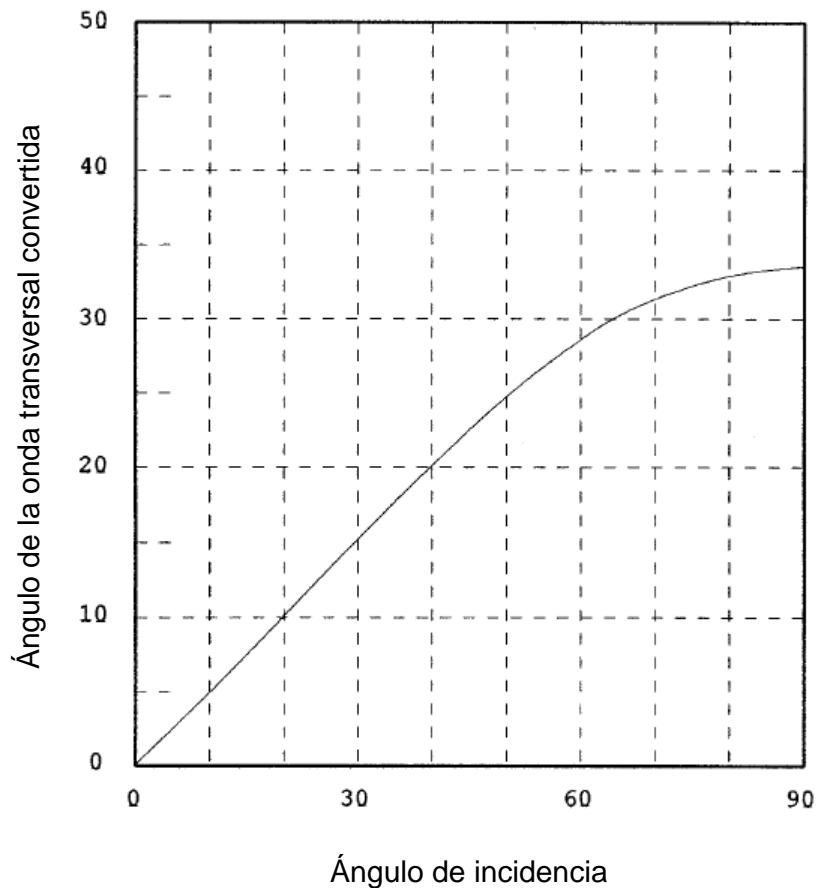


Fig. 2.14: Relación entre el ángulo de incidencia de una onda longitudinal y el ángulo de la onda transversal convertida en una interfase acero-aire [23].

empleada para describir lo que efectivamente es una pérdida gradual de la energía del sonido. La atenuación por su parte resulta del efecto combinado de una serie de parámetros:

- Efectos de interferencia y difracción.
- Absorción (fricción y calor).
- Dispersión (scattering).
- Difusión del haz.

Efectos de interferencia y difracción

Huygens desarrolló una manera muy conveniente de examinar la propagación de la energía de las ondas desde la fuente que las origina. Estipuló que una fuente o un origen puntual se

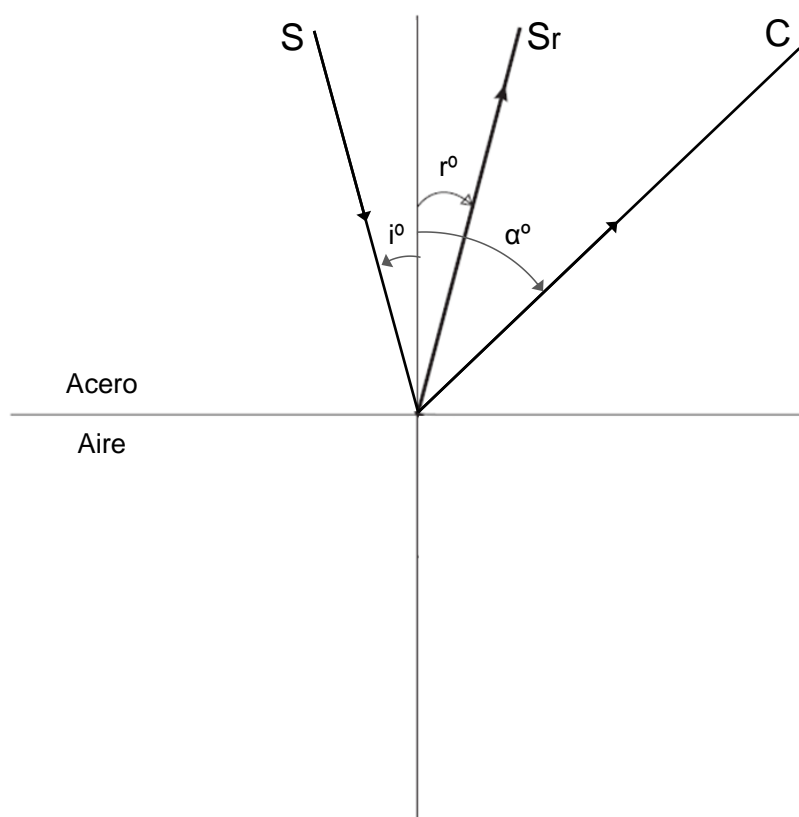


Fig. 2.15: Ángulos de incidencia y reflexión para una onda transversal [23].

asemeja a tirar una piedra en un estanque: la perturbación se aleja del punto donde ha caído la piedra como un círculo expansivo en el agua. En cambio, cuando se trata del sonido, el círculo se transforma en una esfera expansiva, se aleja del foco en todas direcciones.

En cualquier caso, un transductor de ultrasonidos no es un foco puntual, sino que posee un diámetro y una superficie, participes sendos elementos en la transmisión del sonido. Se dice que es una *fente finita* y, según Huygens, se puede considerar como una sucesión de un número infinito de focos puntuales. La figura 2.18 muestra una fuente finita con algunos de estos infinitos focos puntuales (13 en concreto) detenidos un pequeño instante de tiempo después del inicio de la vibración. Puede observarse cómo los frentes de onda de cada foco puntual se combinan entre sí para constituir un único frente de onda al tiempo que el haz se propaga desde su emisor. No obstante, también puede advertirse cómo una pequeña porción del sonido se pierde alrededor de los extremos de la fuente. Se dice entonces que el sonido se ha difractado o que ha sufrido *difracción* en los bordes. Ésta es una de las formas de pérdida de energía que ocurren en el campo próximo.

Para describir la siguiente causa de pérdida de energía obsérvese la figura 2.19. Ésta muestra de nuevo una fuente finita, pero esta vez sólo con los focos puntuales del centro y los extremos

2. Inspección mediante Ultrasonidos

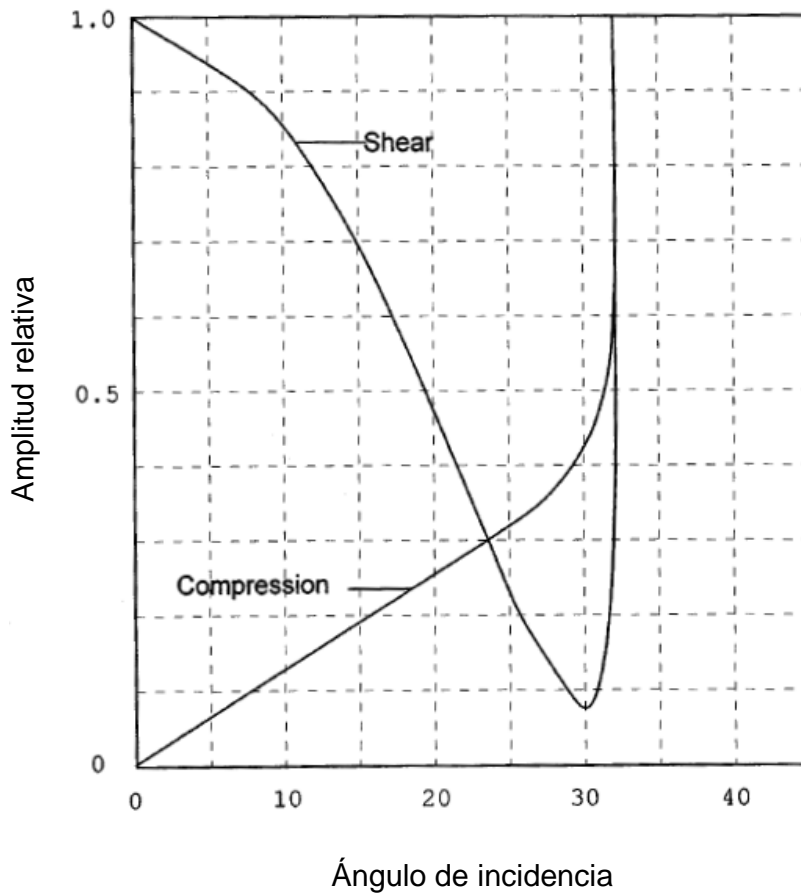


Fig. 2.16: Amplitudes relativas de las ondas transversal reflejada y longitudinal convertida con respecto a la onda transversal incidente para distintos ángulos de incidencia en una interfase acero-aire [23].

para simplificar. Enfrente de la fuente se encuentra un punto P, el cual espera a que le llegue el sonido. En la imagen, la primera onda de presión proveniente del centro del emisor ya ha alcanzado el punto P, mientras que a las ondas de los extremos todavía les queda distancia por recorrer. El punto P experimenta un pequeño impulso en la dirección de propagación de la onda del foco medio debido a ésta.

La figura 2.20(a) muestra la situación justo un instante después, cuando la primera onda de presión proveniente de los extremos alcanza P. El resultado ahora de estos dos impulsos por cada lado vuelve a ser otra vez desplazar P en la dirección de propagación de las ondas. Todo ello sin tener en cuenta lo que llega del centro de la fuente. En la ilustración, al mismo tiempo que las anteriores está llegando la tercera onda de presión proveniente del centro, derivando en un gran impulso para P al combinarse los impulsos de los extremos y del centro. Estos tres impulsos simultáneos conforman lo que se conoce como *interferencia constructiva*, debido a que el efecto final es un aumento localizado de la intensidad del sonido. Ello ha tenido lugar porque P es un número exacto de longitudes de onda tanto del centro como de los extremos de la fuente para la

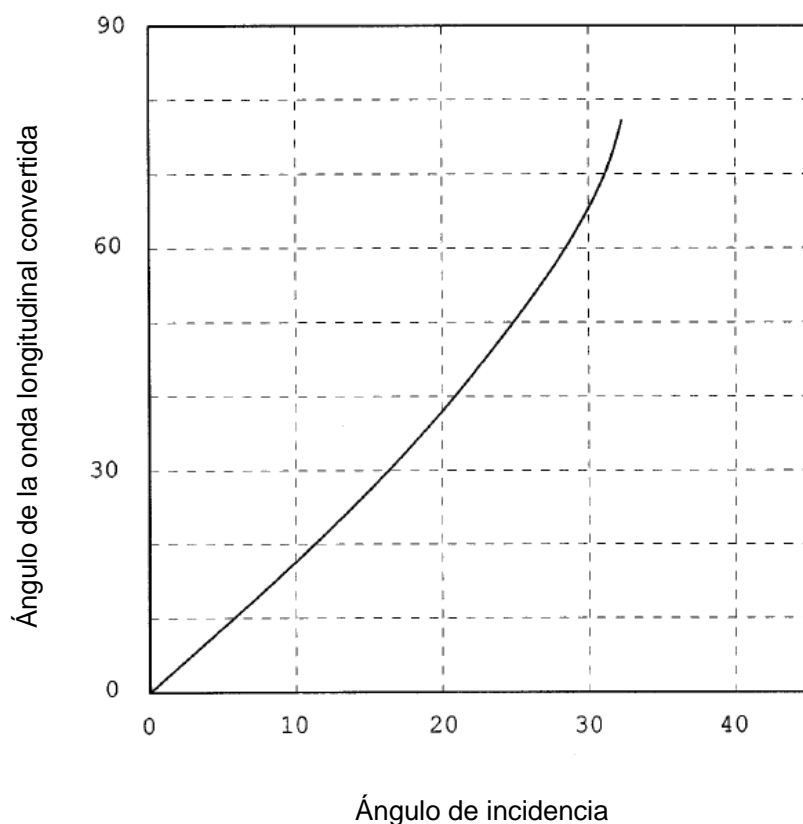


Fig. 2.17: Relación entre el ángulo de incidencia de una onda transversal y el ángulo de la onda longitudinal convertida en una interfase acero-aire [23].

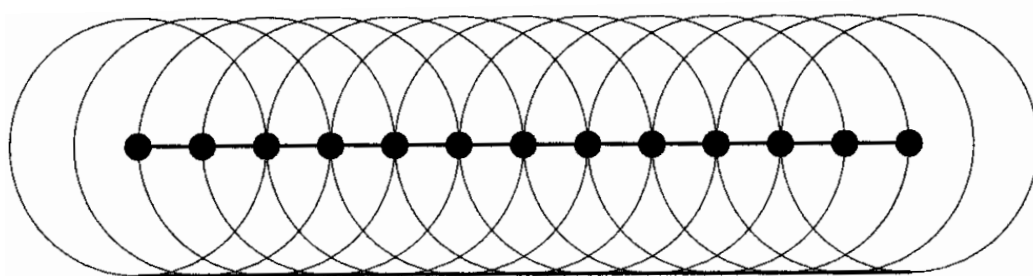


Fig. 2.18: Frente de onda de una fuente finita de sonido [23].

frecuencia de la onda del sonido.

Un cambio en la frecuencia o una variación en la posición de P resultarían en un desfase llegados a P de las ondas provenientes del centro y de los extremos, como muestra la figura 2.20(b). En esta figura, las primeras ondas de presión de los extremos alcanzan P al mismo tiempo que llega una rarefacción desde el centro de la fuente. En P actúan por tanto dos fuerzas contrapuestas. Esto es lo que se conoce como *interferencia destructiva* al derivar en una disminución local de la

2. Inspección mediante Ultrasonidos

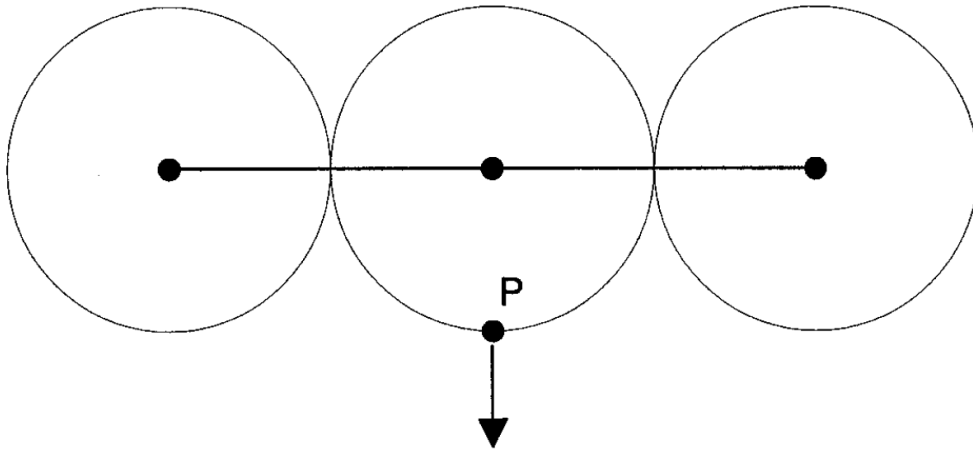


Fig. 2.19: Fuente finita de sonido. Puntos central y extremos [23].

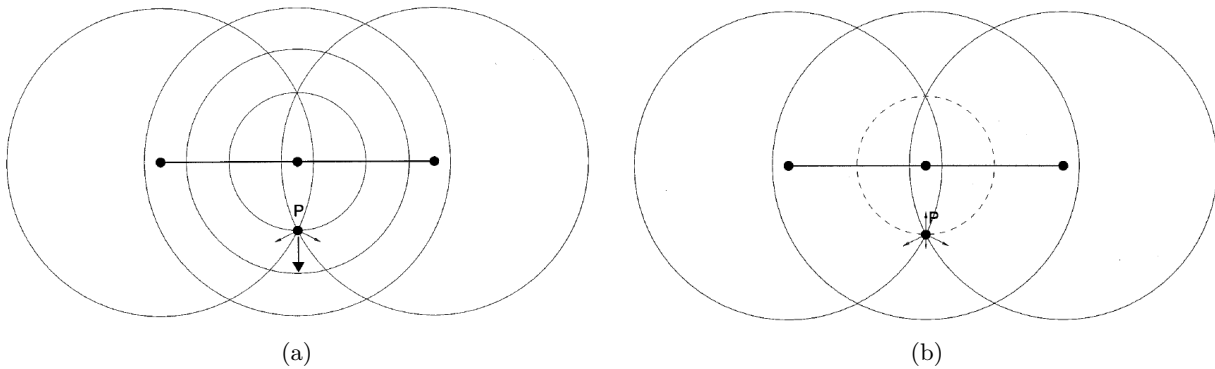


Fig. 2.20: Representación de los efectos de interferencia (a) constructiva, y (b) destructiva.

energía del sonido.

El motivo para esta interferencia destructiva es la diferencia entre trayectorias desde P al centro de la fuente y desde P a los extremos de la misma en comparación con la longitud de onda. Así pues, ocasionalmente se llegará a una distancia de P delante de la fuente para la que la diferencia de trayectorias sea significativamente menor que una longitud de onda (ver figura 2.21) y los efectos de interferencia desaparezcan. Esta distancia marca el fin del campo próximo. La distancia del campo próximo, NF , puede calcularse conforme a:

$$NF = \frac{D^2}{4 \cdot \lambda} \quad (2.8)$$

$$NF = \frac{D^2 \cdot f}{4 \cdot V} \quad (2.9)$$

donde:

D Diámetro del transductor
 f Frecuencia
 V Velocidad

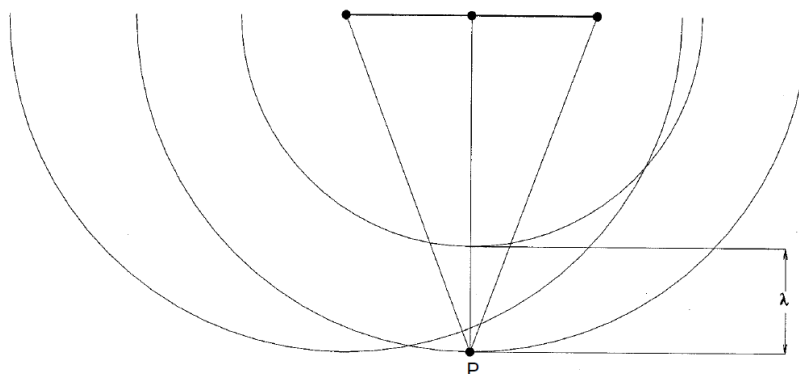


Fig. 2.21: Representación esquemática del fin del campo próximo del haz ultrasónico en el punto P. La diferencia de distancias entre el punto P y los puntos central y los extremos de la fuente es significativamente menor que la longitud de onda del sonido [23].

Absorción

Como ya hemos visto anteriormente, el sonido se propaga a través de la vibración u oscilación de las partículas de un sólido, líquido o gas y el movimiento de estas partículas genera fricción y absorbe parte de la energía. La tasa a la cual la energía es absorbida depende del material a través del cual el sonido se está propagando y de la frecuencia del sonido. En general, cuanto mayor sea la frecuencia, mayor será la absorción. O dicho de otro modo, cuanto menor es la frecuencia del sonido, mayor es la penetración de éste en el material.

Dispersión (Scattering)

Las ondas de presión son reflejadas por las interfases dentro del material en estudio, y en los sólidos, los límites de grano constituyen parte de estas interfases, los cuales además están orientados de forma aleatoria en relación con la dirección del haz ultrasónico. Esto hace que inevitablemente parte del sonido sea reflejado en cualquier dirección, es decir, que se disperse. Los materiales con un tamaño de grano muy fino sufren muy poca dispersión, mientras que aquellos cuyos granos son gruesos experimentan una gran dispersión. La energía dispersada que no llega al receptor es energía perdida, pero la energía dispersada que sí alcanza al receptor es

2. Inspección mediante Ultrasonidos

aún mucho peor, ya que origina pequeñas señales a través de la base de tiempo. Esta condición se conoce como *ruido* y tiende a enmascarar las señales procedentes de las discontinuidades.

La absorción y la dispersión existen como origen de pérdida de energía tanto en el campo próximo como en el lejano. La difusión del haz ultrasónico es la causa restante de pérdida de energía que afecta únicamente el campo lejano.

Difusión

En el campo próximo, el haz posee una forma más o menos cilíndrica del mismo diámetro que el cristal del transductor. Más allá del campo próximo, en lo que se llama el campo lejano, el haz se extiende como un cono. El ángulo del cono θ , también denominado *ángulo de divergencia*, como se muestra en la figura 2.22, se puede calcular a partir de:

$$\sin \frac{\theta}{2} = \frac{1.22\lambda}{D} \quad (2.10)$$

donde:

- $\theta/2$ Mitad del ángulo de divergencia del haz
- λ Longitud de onda
- D Diámetro del cristal del transductor

En la figura 2.23 se muestra la forma en la que la amplitud varía a lo largo del centro del haz. En el campo próximo, existen fluctuaciones en dicha amplitud debido a los efectos de interferencia. El último pico de máxima amplitud, denominado Y_0 , marca el final del campo próximo y el comienzo del campo lejano. En este último, se puede apreciar cómo la intensidad decae de forma exponencial. Desde un punto de vista práctico, la figura 2.23 implica que es muy poco fiable utilizar la amplitud como criterio de aceptación para los defectos detectados en el campo próximo, a menos que se emplee una línea de retardo (generalmente un bloque de metacrilato) entre el transductor y la pieza de trabajo, de forma que el campo próximo quede confinado en esa línea de retardo.

2.3 Equipo y Accesorios

Los sistemas ultrasónicos, como cualquier otro dispositivo sujeto al desarrollo tecnológico, pueden ir desde simples unidades portátiles con batería a sistemas multi-componente de laboratorio pasando por disposiciones intermedias. Ya estén basados en la tecnología digital más moderna

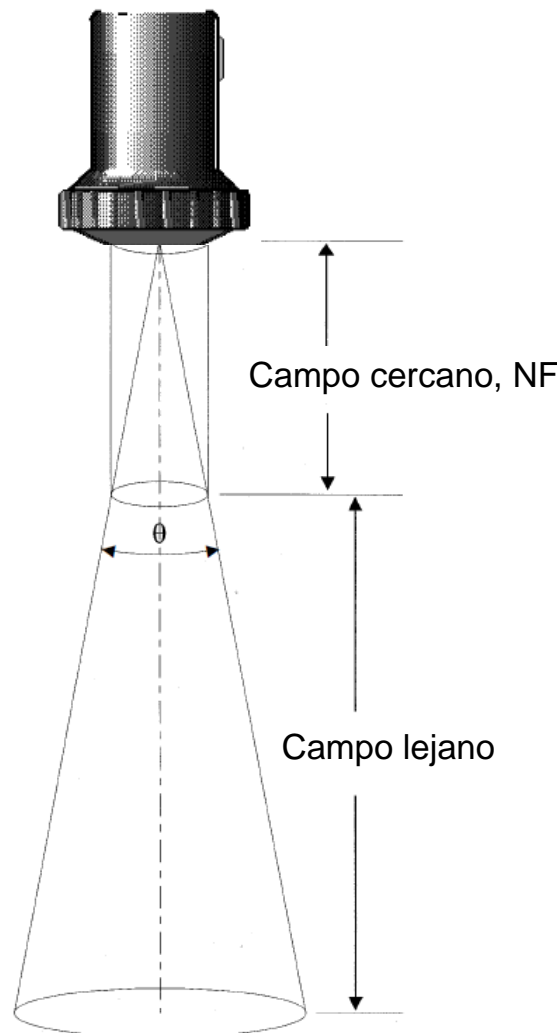


Fig. 2.22: Campos próximo y lejano del haz ultrasónico [23].

o en la original, casi ya desaparecida, analógica, los "sistemas" de ultrasonidos comprenden fundamentalmente los siguientes componentes (ver figura 2.24):

- Transductor o palpador.
- "Pulser", generador de impulsos (temporizador).
- Receptor/Amplificador.
- Display (pantalla).

Para entender cómo funciona un sistema de ultrasonidos tipo, es necesario analizar un ciclo de eventos, o lo que es lo mismo, un pulso. La secuencia es la siguiente:

2. Inspección mediante Ultrasonidos

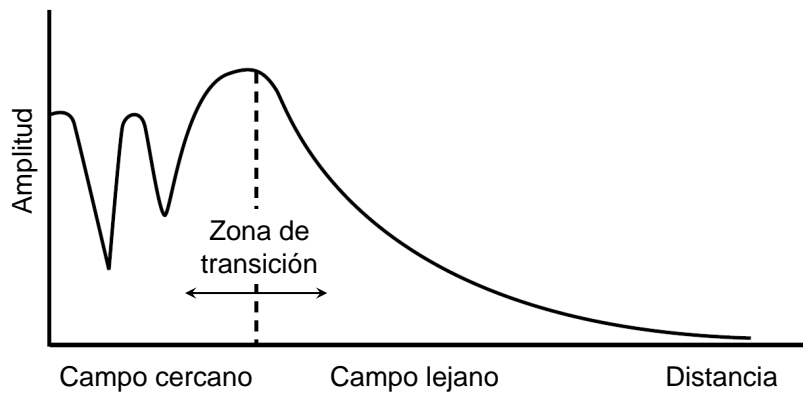


Fig. 2.23: Evolución de la amplitud del haz ultrasónico en su punto central en los campos cercano y lejano [23].

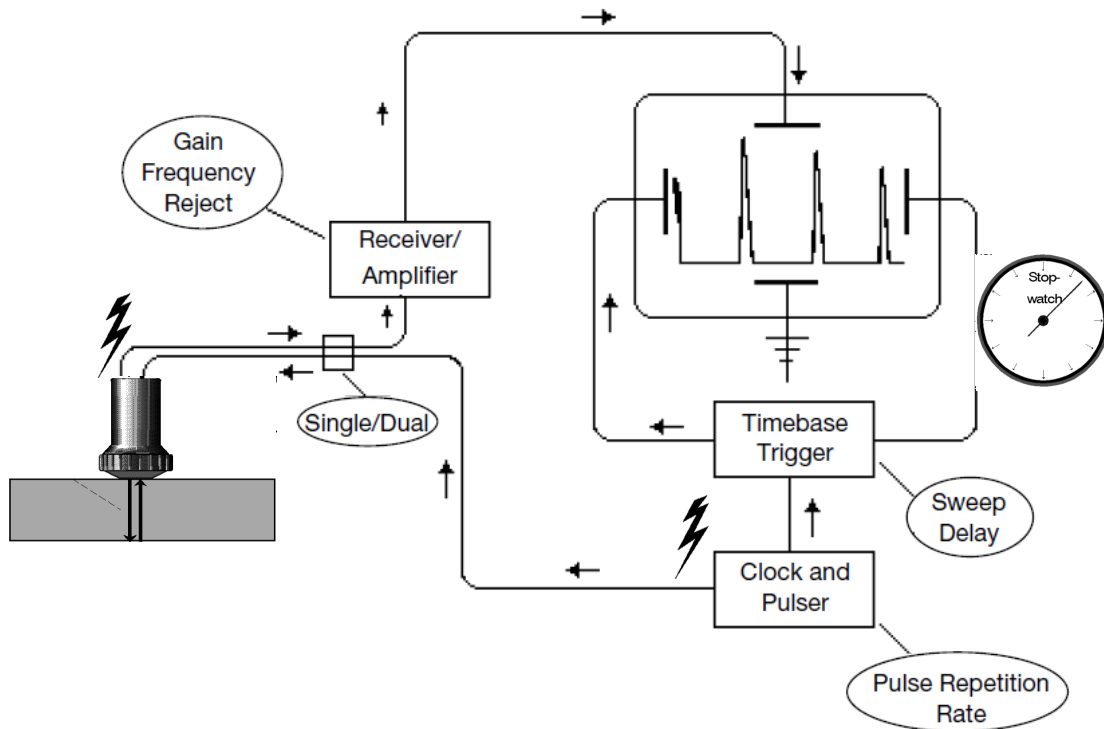


Fig. 2.24: Diagrama de bloques de un equipo de ultrasonidos. Los controles se muestran en las elipses [23, 25].

1. El temporizador da la señal al generador de impulsos para que produzca un impulso corto, de alta tensión con el que excitar al transductor y, al mismo tiempo, suministra una tensión al módulo de activación de la base de tiempos (time-base trigger).
2. El disparador de la base de tiempos establece el "punto 0" en el visualizador e inicia el viaje del puntero a través de la pantalla.

3. El pulso de tensión alcanza el transductor, el cual lo convierte en vibraciones mecánicas (ver apartado 2.3.1), las cuales a su vez entran en la pieza de ensayo. Estas vibraciones (energía) se propagan entonces a lo largo de su "trayectoria de sonido" a través de la pieza. Durante todo este tiempo, el puntero se mueve horizontalmente a través de la pantalla.
4. A continuación, la energía en la pieza refleja de vuelta hacia el transductor la interfase de una discontinuidad o del extremo de la pieza (back wall), donde se reconvierte otra vez en una tensión (la tensión reconvertida es una fracción de su valor original).
5. Este voltaje es entonces recibido, rectificado y amplificado a través del receptor/amplificador.
6. La tensión amplificada se envía luego al dispositivo de visualización, de forma que produce una señal en la pantalla que indica el tiempo que le ha costado a la energía del sonido en realizar una trayectoria de ida y vuelta a través de la pieza, desde el momento en que la energía sale del transductor hasta que es recibida nuevamente por el mismo. El puntero está configurado para que inicie su recorrido en el momento en el que la energía entra en el material. Esta configuración es ajustable manualmente mediante el control cero o de retardo. Este paso es especialmente necesario cuando se utiliza una línea de retardo (bloque de metacrilato entre el transductor y la pieza).
7. El mismo "paquete" de energía que regresa de la pieza, se refleja una vez más hacia abajo en la interfase que constituye la cara superior de la pieza, y realiza un segundo viaje a través del material (el puntero continúa su recorrido horizontal por la pantalla). La energía se refleja una vez más desde el extremo inferior de la pieza (back wall) y vuelve otra vez a ser recibida y amplificada. El amplificador envía una vez más la tensión al visualizador. El puntero se desplaza de nuevo hacia arriba esta vez en una posición retardada o "posterior" en la base de tiempo. Se trata de una señal de repetición, de menor amplitud que la primera debido a factores tales como la atenuación y otras pérdidas de energía que hacen que la intensidad caiga de forma exponencial con la distancia recorrida. El puntero entonces recibe liberación y continúa su recorrido a través de la pantalla.

La secuencia anterior se repite una y otra vez hasta que la energía de la pieza se ha atenuado por completo. Así, en la pantalla se mostrarán múltiples señales repetidas, tantas como las que sean disponibles en la base de tiempo calibrada y de acuerdo a la cantidad de amplificación (ganancia) seleccionada. Por ejemplo, si la pantalla se calibra para 5 mm de acero y la pieza a examinar posee 1 mm de espesor, aparecerán cinco señales en la pantalla, representando cinco trayectorias de "ida y vuelta" de 1 mm de espesor cada una (la energía de la onda, en realidad, recorre 2 mm en cada viaje, uno para ir y otro para volver, pero se muestra en la pantalla como una serie de desplazamientos de 1 mm).

8. Por último, el temporizador pone en marcha el generador de impulsos una segunda vez y se produce el siguiente impulso. El escenario completo (2-7) se repite una vez más, un número

2. Inspección mediante Ultrasonidos

n de veces por segundo. El número n de impulsos por segundo se conoce como la *frecuencia de repetición de impulsos (PRF)* o la *tasa de repetición de impulsos (PRR)*.

2.3.1 Transductor ultrasónico

El transductor es el "extremo frontal" del sistema ultrasónico y, en muchas ocasiones, considerado como el elemento fundamental del mismo. Otros términos utilizados para denominar al transductor son *palpador*, *sonda* y/o *cabeza del sistema*. La palabra transductor proviene del latín "transducere", que significa dirigir a través o transferir. De forma general un transductor convierte o transforma una forma de energía en otra. Así pues, la función de un transductor de ultrasonidos es transferir energía eléctrica en energía mecánica y viceversa.

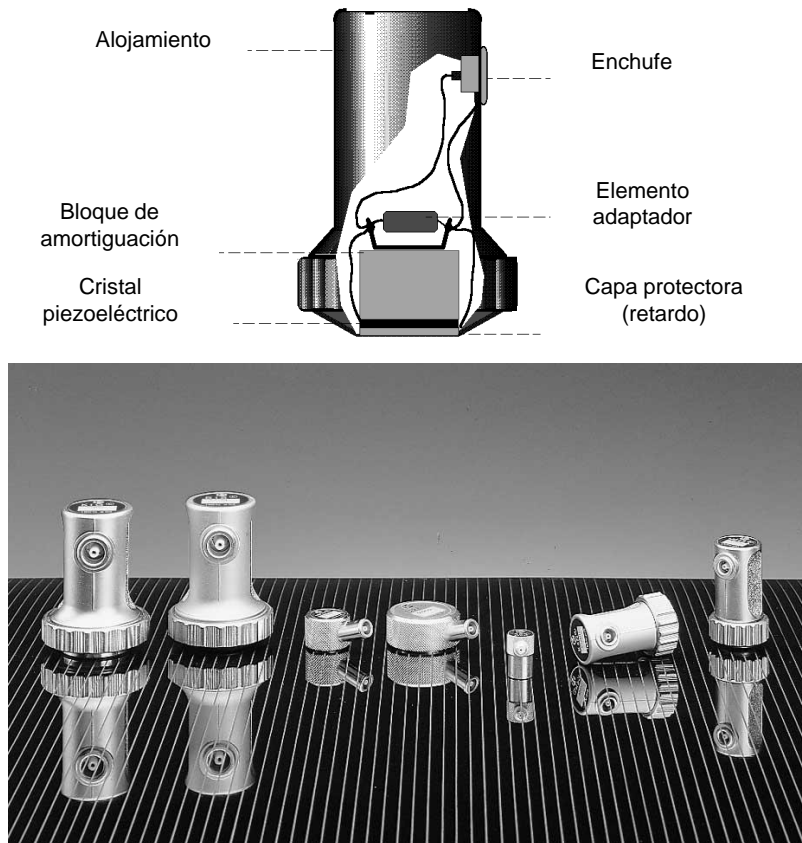


Fig. 2.25: Transductor de ultrasonidos de haz normal. Vista esquemática y aspecto real. [25].

Los transductores ultrasónicos emplean un elemento activo compuesto de un material piezoeléctrico, ya sea cerámico, compuesto o polimérico. Cuando este elemento es excitado por un pulso eléctrico de alto voltaje, vibra a través de un espectro específico de frecuencias y genera un frente de ondas de sonido. Del mismo modo, cuando es excitado y vibra debido a una onda

de sonido entrante, origina a su vez un pulso eléctrico. Como se puede ver en la figura 2.25, la superficie frontal del elemento está cubierta generalmente por una placa de desgaste con el objeto de protegerlo de posibles daños, y la superficie posterior está unida a un elemento de soporte, el cual amortigua mecánicamente las sucesivas vibraciones u oscilaciones del elemento activo, una vez el proceso de generación del ultrasonido o del pulso eléctrico entrante ha sido completado.

Existen cinco tipos de transductores ultrasónicos comúnmente utilizados para la detección de defectos:

- *Transductores de contacto.* Como su nombre indica, estos transductores se utilizan en contacto directo con la pieza de ensayo. Introducen la energía del sonido perpendicular a la superficie, y se utilizan normalmente para la detección y localización de huecos, cavidades, poros, grietas y/o delaminaciones paralelas a la superficie de ensayo, así como para medir espesores.
- *Transductores angulares.* Los transductores angulares se emplean junto con cuñas de plástico, metacrilato principalmente, o epoxi para introducir ondas transversales u ondas longitudinales en la pieza de trabajo a un determinado ángulo con respecto a la superficie (por lo general 30°, 45°, 60° o 70°). Se emplean principalmente en la inspección de soldaduras.
- *Transductores con línea de retardo.* Estos palpadores incorporan una guía corta de plástico, o línea de retardo, entre el elemento activo y el material a ensayar. Se utilizan para mejorar la resolución en las proximidades de la superficie y también en aplicaciones a alta temperatura, donde la línea de retardo protege el elemento activo del daño térmico.
- *Transductores de inmersión.* Estos transductores están diseñados para acoplar la energía del sonido en la pieza a través de una columna o de un baño de agua. Se emplean en aplicaciones de escaneo automatizadas, así como en situaciones donde se requiere un haz muy convergente para mejorar la resolución en la detección de imperfecciones.
- *Transductores de doble elemento.* Por último, los transductores con dos elementos utilizan componentes de transmisión y recepción separados e independientes en un único montaje. A menudo se usan en aplicaciones que involucran superficies rugosas, materiales de grano grueso, detección de picaduras o porosidad, al mismo tiempo que ofrecen una buena tolerancia a elevadas temperaturas.

2.3.1.1 Piezoelectricidad

Como acabamos de ver en párrafos anteriores, el principio funcional de los transductores ultrasónicos está basado en el efecto de la *piezoelectricidad* (ver figura 2.26). En el año 1880 los hermanos Curie, Pierre y Jacques-Paul, descubrieron que al cortar determinados cristales

2. Inspección mediante Ultrasonidos

(sin centros de simetría) en planos específicos y someterlos a una cierta distorsión mecánica eran capaces de generar un potencial eléctrico. Este fenómeno es lo que se conoce como piezoelectricidad (electricidad debida a la presión). El efecto contrario también es posible, es decir, si se aplica una tensión al cristal, éste se distorsiona. El cristal de cuarzo es un excelente ejemplo de este tipo de cristales. Existen también otros materiales piezoeléctricos de origen natural como la turmalina y la sal de Rochelle. Éstos fueron los cristales que se emplearon en los primeros días de los ensayos por ultrasonidos hasta que aparecieron los materiales cerámicos policristalinos (materiales que no exhiben propiedades piezoeléctricas en su estado original), los cuales fueron desarrollados específicamente para esta función. Algunos de los materiales policristalinos más comúnmente utilizados en transductores son el titanato zirconato de plomo (PZT) y el metaniobato de plomo (PMN). La ventaja principal de los transductores cerámicos policristalinos es su eficiencia relativa. Con algunos de estos materiales, la eficiencia puede ser del orden de 60 a 70 veces superior a la de su equivalente en cuarzo.

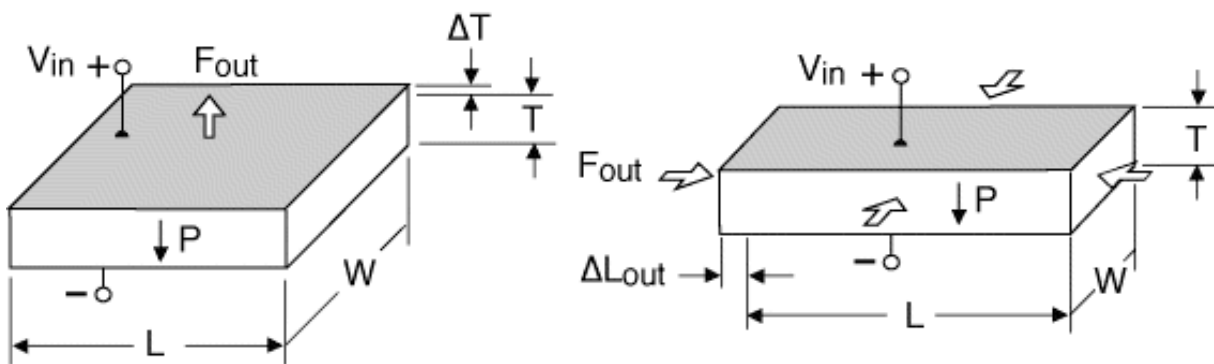


Fig. 2.26: Fenómeno de la piezoelectricidad. Cuando se aplica un campo eléctrico V_{in} que tiene la misma polaridad y orientación que el campo de polarización original a través del espesor T de un cristal piezoeléctrico, la pieza se expande (ΔT) a lo largo del espesor o dirección longitudinal (es decir, a lo largo del eje de polarización) como se muestra en la figura a. Al mismo tiempo, la pieza se contrae (ΔL_{out}) en la dirección transversal (es decir, perpendicular al eje de polarización) como se muestra en la figura b. Cuando el campo se invierte, los movimientos descritos también se invierten. Se trata de un movimiento tipo "pistón": al polarizarse, el elemento crece, se hace más alto y más estrecho y cuando se deja de aplicar tensión, el elemento colapsa y se vuelve más bajo y ancho.

Para la generación de ondas longitudinales, los cristales son polarizados de modo que el elemento de deformación es el que se muestra en la figura 2.27(a). Se pueden generar ondas transversales cuando los elementos se polarizan con la deformación mostrada en la figura 2.27(b).

2.3.2 Representación gráfica. Display

Existen diferentes formas en las que la información ultrasónica puede ser mostrada, aunque tres son las principales. Típicamente, la *representación tipo A* o *A-Scan* es la que arroja un equipo convencional de ultrasonidos. La figura 2.28 muestra una pieza de ensayo con dos reflectores



Fig. 2.27: Generación de (a) ondas longitudinales y (b) ondas transversales mediante el fenómeno de la piezoelectricidad [23].

internos junto con una representación A-Scan. Las visualizaciones A-Scan pueden ser rectificadas o sin rectificar, tal y como puede observarse en la figura 2.29. La diferencia entre ambas reside en que la señal sin rectificar posee trazas positivas y negativas, mientras que la señal rectificada es siempre positiva.

En la figura 2.30 aparece una *representación tipo B* o *B-Scan* la cual muestra un barrido a través de una sección de la pieza a ensayar. O lo que es lo mismo dicho en otras palabras, una vista de las sucesivas secciones transversales. Las señales se muestran en la pantalla como puntos o líneas brillantes. La línea correspondiente al extremo de la pieza opuesto al palpador se queda sin trazar en el caso de la existencia de reflectores internos, al hacer éstos sombra a la energía del sonido al pasar el transductor por encima de ellos.

Una *representación tipo C* o un *C-Scan* es un tipo de representación de mapeo. Es una vista en sí de la pieza de ensayo (ver figura 2.31). La tecnología actual permite la grabación de estas imágenes de forma digital y las muestra en diferentes colores en un monitor. El transductor es movido hacia atrás y adelante conforme a cierta secuencia, a fin de escanear la totalidad de la pieza como se puede observar en la misma figura 2.31.

2.4 Principales Variables

Como en cualquier otro procedimiento, existen una serie de variables que pueden influir en un examen ultrasónico. Debido a la gran cantidad de materiales diferentes a ensayar, las configuraciones de los componentes, así como las anomalías que pueden darse durante una inspección ultrasónica, resulta imposible hacer una lista o predecir toda y cada una de estas variables. En las siguientes subsecciones se van a tratar algunos de estos parámetros más comunes que pueden determinar los resultados de un ensayo de este tipo.

2. Inspección mediante Ultrasonidos

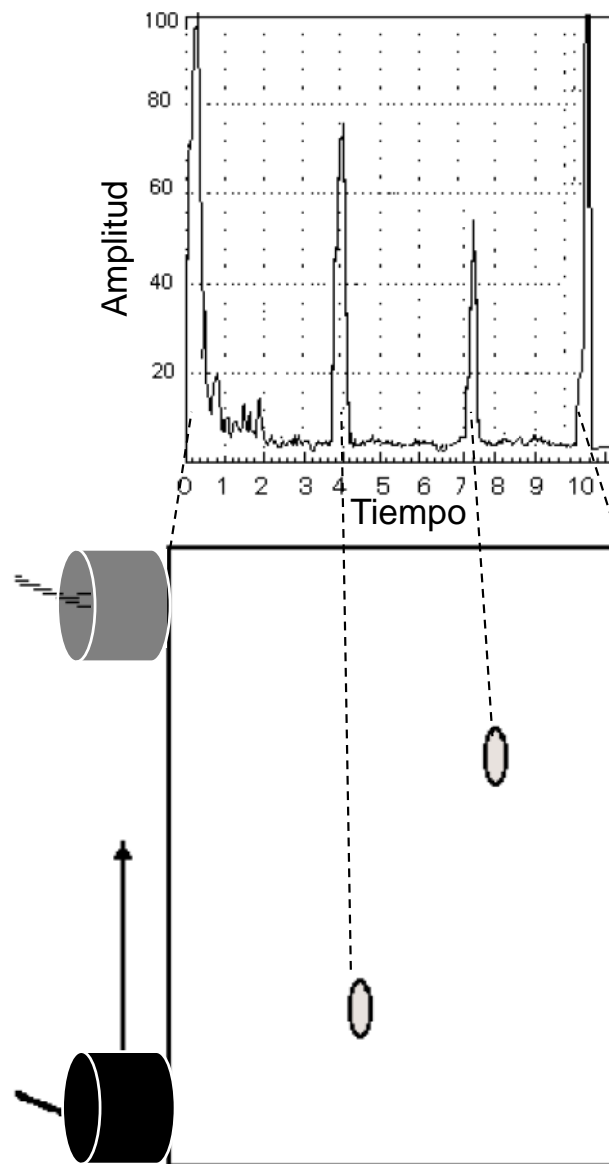


Fig. 2.28: Representación tipo A (A-Scan) [23].

2.4.1 Temperatura y Velocidad

La temperatura es un factor importante cuando se considera un ensayo ultrasónico. La temperatura afecta a la velocidad del sonido en la mayoría de los materiales en mayor o menor grado en función de la naturaleza de dicho material. El agua, por ejemplo, es uno de estos materiales que experimenta cambios en la velocidad con la temperatura. La velocidad del sonido en el agua a 20°C es de aproximadamente 1480 m/s, mientras que a 30°C es de aproximadamente 1570 m/s. En el otro extremo de la escala, el sonido en el agua a 1°C se propaga alrededor

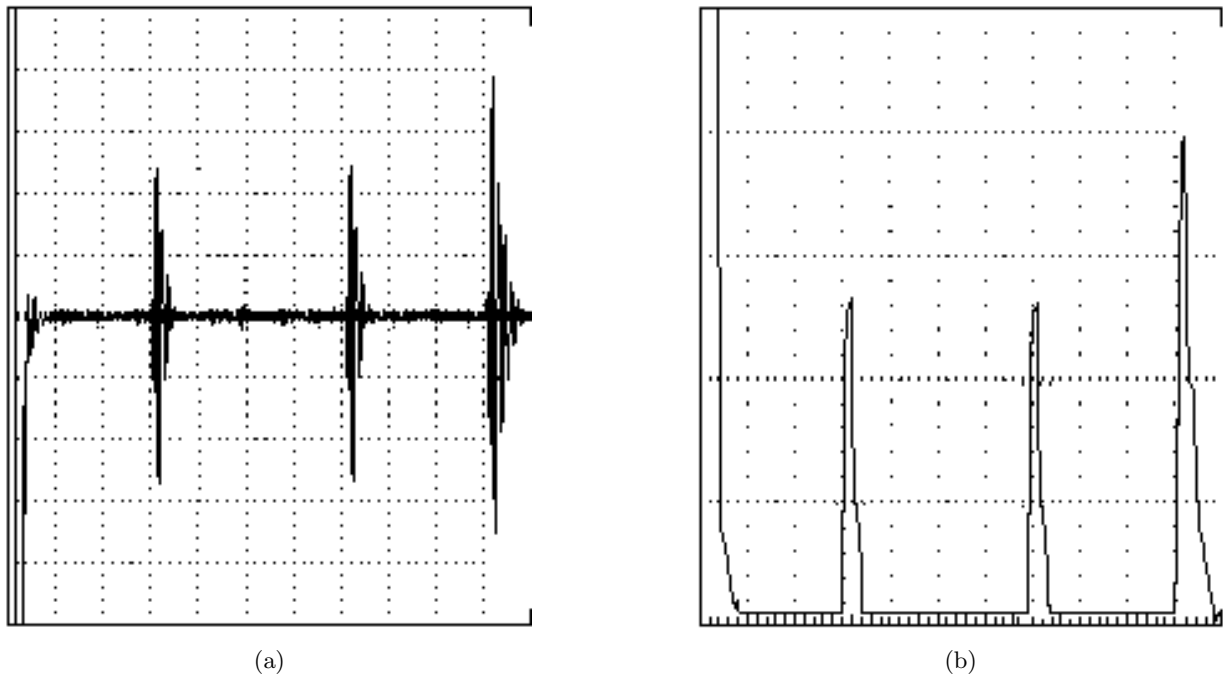


Fig. 2.29: Señal A-Scan (a) sin rectificar y (b) rectificada [23].

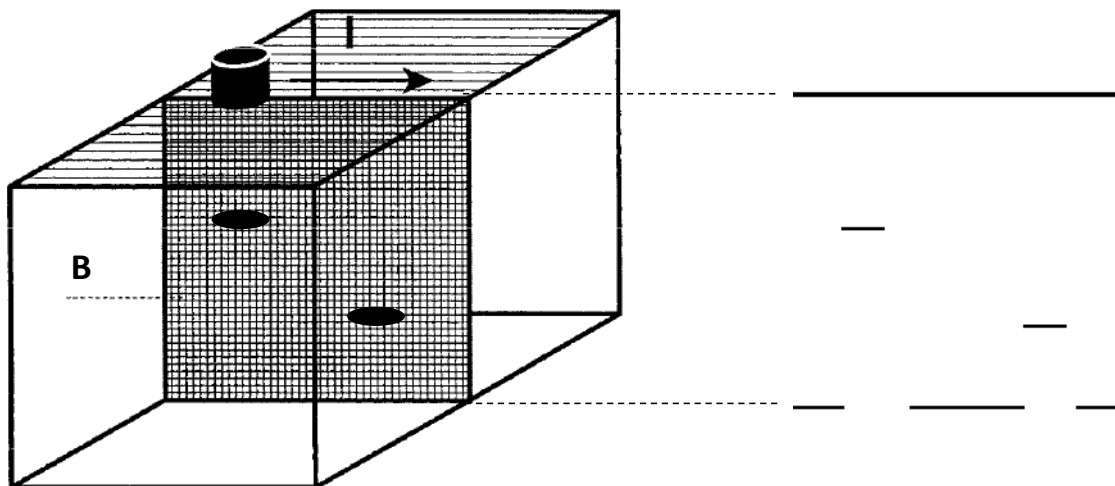


Fig. 2.30: Representación tipo B (B-Scan) [23].

de los 1414 m/s. Por el contrario, los cambios de velocidad en los metales no son tan bruscos como en el agua, pero no por ello dejan de producirse. Al llevar a cabo los ensayos, se deben considerar las variaciones de temperatura entre el patrón de calibración y el componente a testear. Algunas especificaciones requieren que la diferencia de temperatura entre el estándar de calibración y el componente no sobrepase los 7°C. No obstante, la temperatura del metacrilato

2. Inspección mediante Ultrasonidos

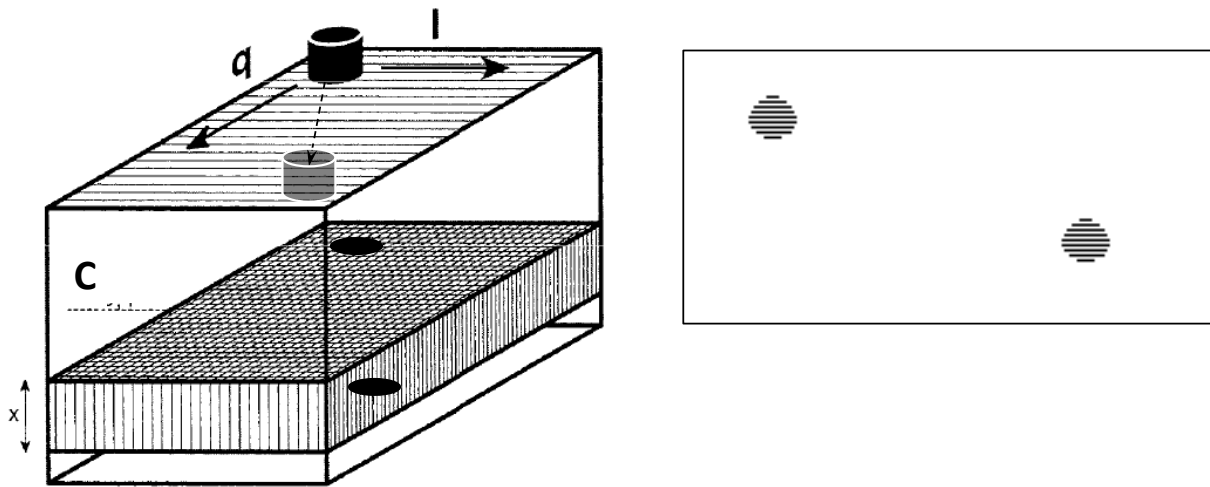


Fig. 2.31: Representación tipo C (C-Scan) [23].

o línea de retardo en los ensayos con transductores angulares posee mayor influencia que la del propio componente a ensayar. Las variaciones de temperatura pueden provocar cambios en el ángulo del haz y/o alterar la demora aparente sobre la base de tiempo. Cuando se realizan exámenes a alta temperatura generalmente son necesarios transductores y acopladores especiales resistentes a dichas temperaturas. Los bloques de calibración también deben ser calentados a una temperatura similar a la del componente a ser examinado antes de la calibración, así como los propios transductores. Las variaciones de temperatura también resultarán en cambios dimensionales de la parte (dilatación-contracción), que deben ser tenidos en cuenta a la hora de calibrar y examinar el material.

2.4.2 Atenuación

Además del cambio en la velocidad, la temperatura también puede afectar a la cantidad de atenuación en algunos materiales. Los cambios aparentes en la atenuación pueden ser indicativos de cambios en la estructura del material. El acero endurecido, por ejemplo, presenta menos atenuación que su homólogo no tratado. Los cambios repentinos en la amplitud de la señal pueden dar información valiosa sobre el componente que está siendo examinado. La microporosidad en el material produce el mismo efecto en la atenuación aparente. El material que exhibe una alta atenuación puede requerir de un segundo examen utilizando frecuencias más bajas debido al más que probable elevado tamaño de grano.

2.4.3 Frecuencia y Tamaño de grano

Tal y como hemos visto en las secciones 2.2.4.7 y 2.2.4.7, en general, cuanto mayor sea la frecuencia, mayor será la absorción. O dicho de otro modo, cuanto menor es la frecuencia del sonido, mayor es la penetración de éste en el material. Por lo que respecta al tamaño de grano, aquellos materiales con un tamaño de grano muy fino sufren muy poca dispersión, mientras que aquellos cuyos granos son gruesos experimentan una gran dispersión, al ser el tamaño de grano propiamente un reflector del sonido.

2.4.4 Condiciones superficiales

Otra variable significativa es la condición de la superficie. Las diferencias en el acabado superficial pueden dar lugar a grandes variaciones en los resultados de un ensayo. La pintura y/u otros recubrimientos pueden tener efectos similares. Los recubrimientos fuertemente adheridos a la superficie generalmente permiten una buena transferencia de la energía. Las capas sueltas o la descamación son indeseables y deben ser retiradas antes de realizar el análisis. Al calibrar el equipo para fijar la sensibilidad de referencia en aplicaciones críticas, es imprescindible evaluar primero el componente con el objeto de señalar cualquier pérdida de energía debido a la condición superficial y las variaciones en la atenuación.

2.4.5 Cambios en el diámetro

Los cambios en el diámetro de la superficie de ensayo pueden resultar en cambios en la sensibilidad del mismo. El tamaño efectivo del transductor se limita a su área de contacto. Es altamente recomendable llevar a cabo la calibración del sistema sobre una superficie con un diámetro similar con el que se escanea el componente sometido a examen. La compensación debida a cambios en el diámetro debe realizarse ya sea agregando o sustrayendo ganancia después de la calibración, previa al análisis del componente.

2.4.6 Presión de contacto y Acoplamiento

La cantidad de gel o líquido de acoplamiento utilizado y la presión de contacto en el transductor pueden crear diferencias en la amplitud de la señal. Si el acoplador empleado es escaso, la superficie permanece seca y, por lo tanto, se origina un espacio o interfase de aire entre el transductor y la superficie de la pieza. Del mismo modo, una presión excesiva puede evacuar el acoplador fuera del área del transductor.

2. Inspección mediante Ultrasonidos

2.4.7 Estructuras dendríticas

Las dendritas son granos con forma de rama las cuales se dan en ciertas estructuras metálicas y pueden causar problemas, sobre todo en las soldaduras de acero inoxidable. Estas dendritas se forman en la dirección de la disipación del calor durante el proceso de soldadura. Un único grano puede crecer a partir de una sola pasada de soldadura a la siguiente, dejando granos alargados que pueden redirigir efectivamente la energía del sonido. Las indicaciones o señales que se trazan originarias, por ejemplo, de la línea de fusión en realidad pueden provenir de la raíz de la soldadura si la energía ha sido redireccionada. Para paliar este efecto es necesario el empleo de procedimientos especiales incluyendo el uso de transductores de ondas de compresión refractadas.

2.4.8 Ganancia

El uso de una ganancia excesiva, esto es, una cantidad de amplificación desmesurada puede exagerar las indicaciones o señales que de otra manera hubieran sido insignificantes. Esto pone de relieve la necesidad de una calibración precisa.

2.4.9 Otros factores

Otros factores como la frecuencia del transductor, su diámetro y el ángulo del haz pueden repercutir del mismo modo en el resultado del ensayo. Es necesario seguir un procedimiento cualificado en la realización de los ensayos, sobre todo cuando la repetibilidad puede suponer una complicación. El análisis por ultrasonidos requiere de una cuidadosa consideración de todas las variables. El profesional debe tener en cuenta todas estas variables y otras que puedan presentarse. La atención, el conocimiento y la capacidad de reconocer las anomalías son pues fundamentales.

Método experimental

3.1 Material

El material estudiado en este proyecto es el acero DX53D + Z100MB de acuerdo a la norma EN 10346:2010 (Productos planos de acero recubiertos en continuo por inmersión en caliente). Se trata de un acero al carbono de baja aleación galvanizado en caliente, es decir, de un sustrato de acero dulce sobre el que se aplica un recubrimiento de zinc mediante un proceso continuo de galvanización por inmersión en baño caliente, destinado principalmente a la conformación en frío (ver figura 3.1).

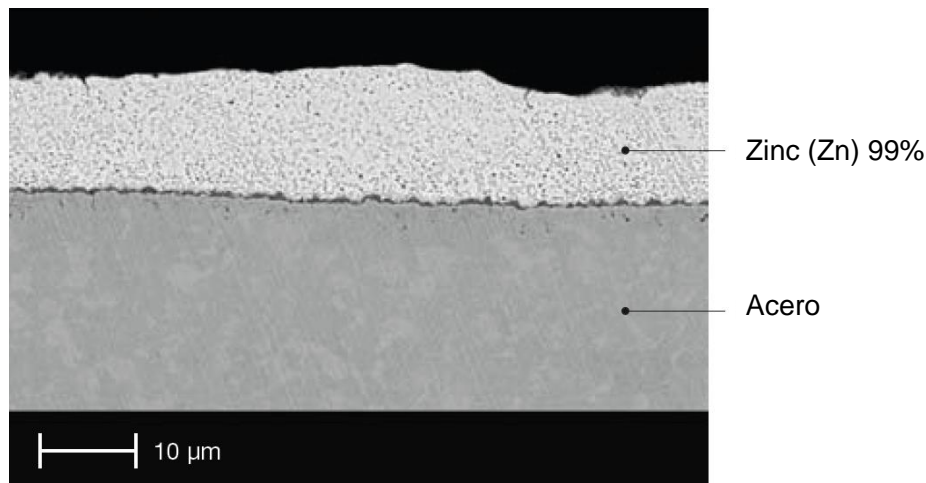


Fig. 3.1: Sección transversal del acero galvanizado DX53D + Z100MB. La capa clara de zinc es notoriamente visible sobre el sustrato de acero, de color más oscuro. Cuanto más gruesa sea la capa de zinc, mejor es la protección contra la corrosión, pero menor su compatibilidad con la mayoría de procesos de conformación y ensamblaje [Stroncoat. Salzgitter Flachstahl].

El significado de la relación de dígitos en la nomenclatura del material se detalla a continuación. El primer sumatorio corresponde al sustrato y el segundo, al recubrimiento. Así

3. Método experimental

pues, "DX53D" se refiere al tipo o grado de acero, en este caso, acero al carbono de baja aleación con número 1.0355. La parte correspondiente al recubrimiento se subdivide a su vez en otros tres campos. Por un lado, "Z" es concerniente al proceso de revestimiento, galvanizado con 99% de zinc para el caso en estudio; "100" se refiere al volumen de recubrimiento de zinc en g/m^2 , concretamente al volumen mínimo a ambos lados del material; y "MB", al tipo de superficie, para nuestro caso, superficie mejorada derivada de sucesivas laminaciones.

La composición química y las propiedades mecánicas del material, así como las propiedades del recubrimiento, se detallan en las tablas 3.1, 3.2 y 3.3 respectivamente.

C	Si	Mn	P	S	Ti
max.	max.	max.	max.	max.	max.
0.120	0.500	0.600	0.100	0.045	0.300

Tabla 3.1: Composición química del acero DX53D (en porcentaje en peso %).

Límite elástico R_e ¹⁾	Resistencia a la tracción R_m	Alargamiento de rotura A_{80} ²⁾
140-260 MPa	270-380 MPa	$\geq 30\%$

Tabla 3.2: Propiedades mecánicas del acero DX53D. 1) Si no se menciona el punto de fluencia, se aplica el valor del límite elástico para un valor de elongación del 0.2 % ($R_{p,0.2}$). Si se menciona, se aplica el valor para el límite inferior de fluencia (R_{eL}). 2) Espesor $\geq 0.71mm$. Espesor $0.5mm < t \leq 0.70mm$ menos dos unidades. Espesor $\leq 0.50mm$ menos cuatro unidades.

Volumen mínimo de recubrimiento a ambos lados		Valor de referencia teórico para el espesor de recubrimiento a cada lado		Densidad
Prueba superficial triple	Prueba superficial individual	Valor típico	Rango	
100 g/m^2	85 g/m^2	7 μm	5-12 μm	7.1 g/cm^3

Tabla 3.3: Propiedades del recubrimiento Z100MB.

La principal característica de este material, como de forma general en el resto de aceros galvanizados en caliente, es su excelente resistencia a la corrosión así como una muy buena aptitud para el conformado. Por ello, este material es apto para su utilización en una amplia gama de aplicaciones, tanto en interiores como en exteriores, desde perfiles para techos y revestimientos de fachadas en el ámbito de la construcción hasta partes estructurales de automóviles, buques y aerogeneradores, pasando por armarios eléctricos, señales de tráfico y una amplia gama de electrodomésticos. Destaca como acabamos de señalar para la cuestión que nos acontece, su uso

en piezas estructurales de la carrocería del automóvil.

De forma general, presentan buenas condiciones para la soldadura los materiales de acero, no aleados o con aleación baja, con contenidos de carbono de hasta 0.20% en masa o un equivalente de carbono de hasta 0.45%, que para los materiales de acero sin aleación se determina de acuerdo a la fórmula siguiente [12]:

$$CE = C + Mn/6 \quad \text{en \%} \quad (3.1)$$

donde:

- CE Equivalente de carbono
- C Contenido de carbono en % en masa
- Mn Contenido de manganeso en % en masa

Por el contrario, un contenido mayor de carbono puede dar lugar a un endurecimiento excesivo en la zona del metal base afectada por el calor y, como consecuencia, a su fragilización. Por ello el acero DX53D, con un contenido máximo de carbono de 0.12% y de carbono equivalente de 0.22%, no presentan dificultad alguna para la soldadura.

No obstante, la soldabilidad de materiales de acero sin aleación o con aleación baja se ve notablemente afectada por los recubrimientos de zinc. Como valor indicativo general se considera que los espesores de capa de zinc hasta un máximo de 10 μm pueden soldarse con suficiente seguridad para el proceso, es decir, hasta "Z100" o "ZE75", como es nuestro caso [12]. Por ello el acero DX53D ofrece buena soldabilidad.

Para llevar a cabo los experimentos se toman una serie de chapas de dimensiones 100 x 60 mm con un espesor teórico o nominal de 1.9 mm (ver figura 3.2). El espesor real se determina empleando un micrómetro Mitutoyo con un rango de medición de 0 a 25 mm y precisión de centésimas de milímetro (0.01 mm). La relación de los grosores medidos se muestra en la tabla 3.4. Incidir en la importancia de establecer empíricamente el espesor de estas muestras para, como veremos más adelante, proceder a la calibración del equipo ultrasónico.

Espesor (mm)	5.1	6.1	7.1	6.2	3.3	4.3	5.3
Chapa superior 1	1.94	1.88	1.90	1.74	1.93	1.96	1.91
Chapa inferior 2	1.79	1.95	1.87	1.78	1.98	1.80	1.89

Tabla 3.4: Espesores medidos de las muestras.

3. Método experimental

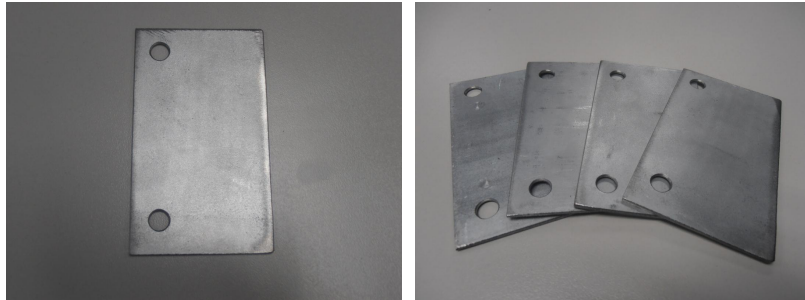


Fig. 3.2: Chapas de acero DX53D + Z100MB de dimensiones 100 x 60 y espesor nominal 1.9 mm empleadas en los experimentos.

3.2 Soldadura GMAW de chapas en unión a solape

En el presente estudio se emplea un útil diseñado y construido específicamente ad hoc para soldar uniones de chapas a solape en automático, el cual puede observarse en la figura 3.3. Con él se llevaron a cabo una serie de soldaduras para su posterior análisis ultrasónico. Dos son las premisas con las que se desarrolló el utillaje teniendo en cuenta las singularidades de las uniones a solape. Por un lado, asegurar o facilitar el contacto entre las dos chapas, impidiendo así la existencia de un hueco excesivo entre ambas, y, por otro, evitar las deformaciones, distorsiones y/o abombamientos de las piezas característicos en los procesos de soldadura debido al calor generado.

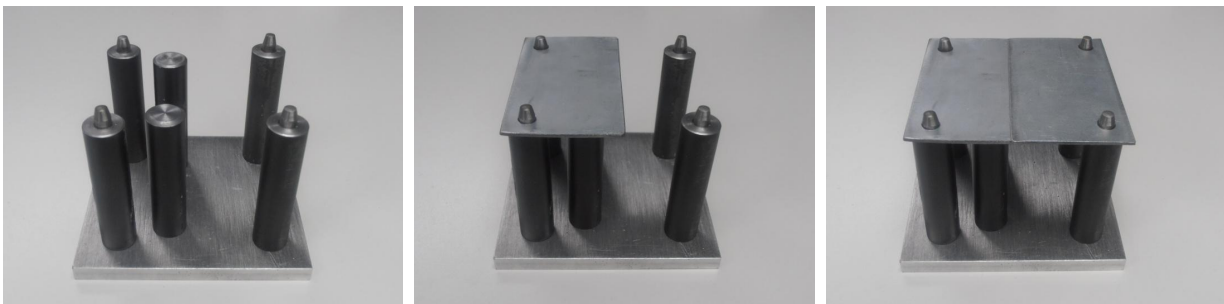


Fig. 3.3: Útil específico desarrollado para soldar chapas en unión a solape.

Una soldadura queda inequívocamente identificada por su microestructura y otra serie de parámetros como son la cantidad de salpicaduras, la cantidad de poros, un exceso de llenado o un llenado insuficiente, etc. Aunque estos parámetros no se puedan medir o cuantificar fácilmente, sí se pueden relacionar con características del proceso. Asimismo, muchas de estas características se relacionan intrínsecamente con la masa y el calor transferido desde el proceso GMAW al baño de soldadura. Y éstos se ven afectados a su vez por las propiedades del flujo de gotas que se funden y desprenden del electrodo. Por normal general, una soldadura óptima se produce cuando las gotas fundidas son uniformes en tamaño y su desprendimiento desde el electrodo a la pieza a

3.3. Ultrasonidos: equipo, calibración y mediciones

soldar se realiza a intervalos uniformes.

Siguiendo estas premisas, se consideran en este trabajo tres inputs del proceso GMAW -intensidad en circuito abierto, velocidad de alimentación del hilo o ratio de alimentación y caudal de gas de protección- y dos outputs -corriente de soldadura y tensión en el arco- como factores determinantes de las características de la soldadura. La distancia entre el tubo de contacto y la pieza se mantuvo en todo momento constante para el conjunto de los experimentos, así como la velocidad de avance de la antorcha, solidaria a la velocidad de desplazamiento del robot con el que se llevaron a cabo las soldaduras.

Así pues, en cada soldadura, se aplicaron al sistema una intensidad de soldadura en circuito abierto, una velocidad de alimentación de alambre y un caudal de gas predeterminados, y se midieron la corriente y la tensión de arco resultantes, con el fin de establecer cuatro casuísticas diferentes: soldadura óptima; soldadura con penetración escasa; soldadura con exceso de penetración o recrecido de cordón; y soldadura con coalescencia de poros.

Los datos a registrar o outputs del equipo de soldadura GMAW se contabilizaron de forma que, primero, se descartaron las señales registradas durante el primer segundo para no tener en cuenta los transitorios y, a continuación, se promediaron las señales de los segundos restantes a través del tiempo. Así, los valores finales anotados representan de una forma más fidedigna los valores estacionarios o estáticos de corriente y tensión de arco en la soldadura.

Todas las soldaduras se realizaron utilizando una máquina de soldadura GMAW Fronius de la serie TransPulsSynergic 4000, en modo arco pulsado, y un robot KUKA VKR 200-2TJ, a cuya muñeca va acoplada la antorcha del equipo de soldadura como herramienta de trabajo (ver figura 3.4). Cada soldadura, de una longitud aproximada de 80 mm, utiliza los parámetros que se indican en la tabla 3.5. La composición química del hilo de aporte se muestra en la tabla 3.6. La tabla 3.7 muestra el set o combinación de parámetros específicos de input de calor desde el proceso GMAW hasta el baño de soldadura para cada experimento de acuerdo a los cuatro casos a tratar. Antes de iniciar la soldadura, las chapas se limpiaron primero con un cepillo de alambre del mismo material que el material base previamente sin usar, y después con un paño empapado en acetona.

3.3 Ultrasonidos: equipo, calibración y mediciones

Las soldaduras, una vez realizadas, se tomaron para el análisis mediante ultrasonidos. En parte de ellas no se llevó a cabo posterior al proceso de soldadura ningún tipo de pulido, fresado o refinado de la superficie del cordón, manteniendo así intacto el estado de la soldadura tras su realización. En otra parte de las muestras, en cambio, sí se procedió al rectificado de los cordones. El equipo ultrasónico empleado en las mediciones es el dispositivo "SpotChecker" de General Electrics (GE). Sensing & Inspection Technologies, software USLT 2000 v3.0.4 con un filtro de banda ancha de

3. Método experimental



Fig. 3.4: Máquina de soldadura GMAW Fronius y robot KUKA con el que se llevaron a cabo las soldaduras.

7-20 MHz, junto con un único transductor de haz directo de onda longitudinal, también de GE, y 20 MHz de frecuencia, con un retardo de metacrilato de 4 mm de longitud y contacto directo sobre el cordón con gel "AquaUltra Clear" de MeδGel como medio de acoplamiento. La configuración o lay-out de la instrumentación ultrasónica empleada puede observarse en la figura 3.5.

El empleo de un retardo de metacrilato entre el transductor y la pieza de trabajo se debe principalmente a dos motivos. En primer lugar, al colocar el palpador directamente sobre el cordón de soldadura, y dada la elevada rugosidad de éste y la posible existencia de pequeñas salpicaduras, se requiere de una superficie de contacto suficientemente resistente al desgaste. Unido ello al elevado coste de los palpadores ultrasónicos, resulta conveniente el empleo de un consumible a modo de sufridera para evitar el contacto directo con el palpador. En segundo lugar, pero no por ello menos importante, se debe a la variación de la amplitud de la onda ultrasónica a lo largo del centro del haz del transductor desde el punto de salida o abandono del mismo. Como se ha visto en el apartado 2.2.4.7, en el campo próximo existen fluctuaciones en la amplitud debido a los efectos de interferencia, por lo que no se puede emplear esta variable como criterio de aceptación para los defectos detectados en este primer campo. Con el empleo de la línea de retardo, el campo próximo queda confinado en la longitud de ese bloque de metacrilato y la totalidad de la onda dentro del material a examinar corresponde con el campo lejano del haz, donde la amplitud ya no experimenta oscilación alguna al desaparecer los efectos de interferencia.

Con estas dos premisas, se diseña y elabora un retardo de 4 mm de longitud en forma de cilindro, con una base de contacto sobre el elemento a ensayar de diámetro 5 mm, el cual puede verse en la figura 3.6. Las dos bases del retardo se encuentran pulidas para minimizar la pérdida

3.3. Ultrasonidos: equipo, calibración y mediciones

Material de soldadura	DX53D + Z100MB
Ángulo de la antorcha	0°
Composición del gas de protección	82%Ar 18%CO ₂
Presión del gas de protección	3 bar
Caudal del gas de protección	12-22 l/min
Tiempo de preflujó	0.2"
Tiempo de postflujó	0.5"
Composición del electrodo	AWS A5.18/A5.18M: ER70S-6 EN ISO 14341-A-G 46 4 M3Si1/42 3 C3Si1
Diámetro del electrodo	1 mm
Modo de operación del equipo GMAW	Corriente constante; arco pulsado
Tensión de soldadura	19.2-23.4 V
Intensidad de soldadura	63-140 A
Velocidad de aportación del electrodo	3.5-8.5 m/min
Distancia entre la antorcha y la pieza de trabajo	15 mm
Velocidad de soldadura	8-10 mm/s

Tabla 3.5: Condiciones generales de soldadura.

C	Si	Mn	P	S	Ti
max.	max.	max.	max.	max.	max.
0.078	0.850	1.400	-	-	-

Tabla 3.6: Composición química del material de aporte UltraMag EN ISO 14341-A-G 46 4 M3Si1/42 3 C3Si1 con carga de rotura máxima de 590 N/mm²(en porcentaje en peso %). Metal depositado.

de transmisión del ultrasonido entre el transductor y el retardo, y el retardo y la pieza. En la interfase entre el transductor y el retardo se utiliza aceite como medio de acoplamiento. Por último se mecanizan una serie de tres cortes o ranuras laterales a lo largo de su longitud, para amortiguar las reflexiones laterales del ultrasonido sobre el propio retardo y así disminuir el nivel de ruido en la señal.

El modo de inspección ultrasónica empleado en todos los experimentos es el de *pulso-eco*. Se trata de la técnica más comúnmente utilizada. Como se ha visto en el capítulo 2.3, un único transductor ultrasónico se utiliza simultáneamente como transmisor y receptor y un número de múltiples ecos queda registrado en el equipo procedentes o reflejados de la parte inferior de la muestra, hasta que la onda termina por completo de atenuarse. Si se conoce el espesor de la muestra, como es nuestro caso, la velocidad de la onda ultrasónica se puede calcular directamente a partir del tiempo de vuelo (TOF) estimado utilizando sucesivos picos o ecos, teniendo en cuenta que este tiempo es el empleado por la onda en recorrer dos veces el espesor de la pieza: un viaje de ida desde el transductor hasta la cara posterior de la pieza y un segundo viaje de vuelta desde

3. Método experimental

Muestra	Intensidad teórica (A)	Tensión real (V)	Intensidad real (A)	Velocidad aporte hilo (m/min)	Velocidad avance (mm/s)	Caudal gas protección (l/min)
7.1	124	21.8	100-112	6	8	22
5.1/6.1	171	23.4	130-140	8.5	8	22
6.2	124	21.8	100-112	6	8	12
3.3/4.3	171	22.9	130-140	8.5	10	22
5.3	74	19.2	63	3.5	10	22

Tabla 3.7: Parámetros de input de calor en el baño de soldadura: tensión de arco e intensidad de soldadura, con respecto a los valores constantes de intensidad en circuito abierto, velocidad de arrastre de hilo y caudal de gas.

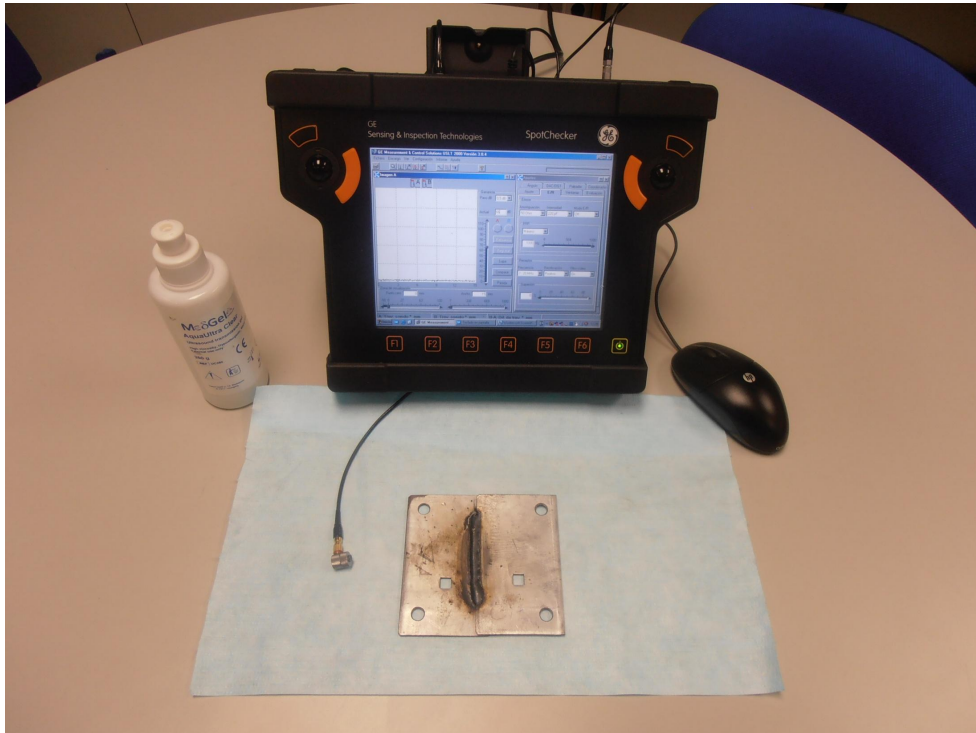


Fig. 3.5: Equipo de ultrasonidos "SpotChecker".

esta última al transductor. Del mismo modo, si en su recorrido a lo largo del espesor, la onda se encuentra con un defecto o, de forma más general, con un reflector intermedio, se generará una nueva señal la cual se visualizará como un segundo pico anterior al pico correspondiente a la parte inferior de la muestra.

Previamente a la realización de las mediciones ultrasónicas, la base de tiempo del "SpotChecker" fue calibrada, de acuerdo con el empleo de un transductor de haz directo de onda

3.3. Ultrasonidos: equipo, calibración y mediciones

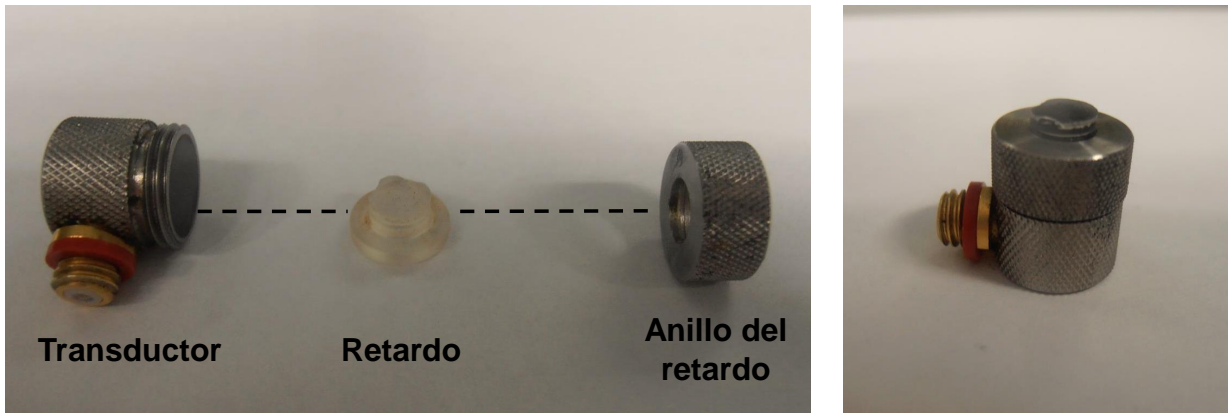


Fig. 3.6: Transductor, retardo y anillo retenedor del retardo.

longitudinal, según los espesores registrados en la tabla 3.4. Para cada unión soldada, se usó una chapa del mismo espesor y material que el de las piezas de ensayo, manteniendo constantes la ganancia y el "cero" del palpador. La distancia desde el transductor hasta la pared opuesta de la chapa o cualquier otro reflector intermedio, puede calcularse entonces a partir de su relación lineal calibrada con la base de tiempo.

La evaluación de la integridad o validez de los cordones de soldadura no se realizó en continuo, sino que, por el contrario, fue con carácter puntual, o lo que es lo mismo, la toma de las distintas señales se llevó a cabo en puntos concretos previamente determinados. Esto es así porque las soldaduras se elaboraron automáticamente. Al trasladarse el robot con una velocidad de desplazamiento y una distancia a las chapas constantes en todo momento, desaparece la variabilidad propia del factor humano y se puede considerar el comportamiento o la naturaleza de la soldadura igual o, por lo menos semejante, a lo largo de su longitud.

Así, para llevar a cabo las mediciones ultrasónicas se descartaron los 10 primeros mm de cordón de soldadura desde cada extremo del mismo. Entonces, los puntos para el examen ultrasónico fueron seleccionados del resto de la región soldada. De acuerdo con la norma interna VW 01106-1: 2009-08 (Soldadura en atmósfera protectora, uniones de chapas de acero. Diseño, ejecución y aseguramiento de calidad) y la norma de ensayo PV 6728: 2009-08 (Soldadura en atmósfera protectora, uniones de chapas de acero. Valoración de las uniones soldadas), la cantidad mínima de longitudes parciales que se han de evaluar con relación a la longitud total del cordón (80 mm), ha de ser de dos para el caso que nos ocupa, al entrar la longitud del cordón en el segundo grupo (≥ 50 mm a 100 mm). Así pues, de los 60 mm restantes se tomaron un total de cuatro medidas ultrasónicas en los puntos equidistantes a 17.5, 32.5, 47.5 y 62.5 mm aproximadamente desde un extremo del cordón, colocando o apoyando el palpador directamente sobre el mismo. En cada medición se registraron la altura o amplitud de eco y el tiempo de propagación o tiempo de vuelo de la onda para su posterior tratamiento y análisis. De la misma forma, la visualización de la onda ultrasónica a través de la pantalla del "SpotChecker" se realiza de acuerdo a la representación

3. Método experimental

tipo A (A-Scan) (ver sección 2.3.2).

3.4 Análisis metalográfico: microscopia óptica

Tras la finalización del examen ultrasónico, se compararon los resultados de forma destructiva a través del análisis metalográfico de los cordones usando microscopia óptica con el fin de corroborar la precisión y/o la exactitud de la técnica ultrasónica propuesta.

Para ello, las probetas se seccionaron en ángulo recto al eje longitudinal del cordón en aquellos puntos donde se obtuvieron las distintas mediciones ultrasónicas con ayuda de una cortadora "Abrasiment 2" de Buehler y se pulieron finamente en dos etapas. En la primera de ellas, únicamente se desbastaron o eliminaron las rebabas presionando la superficie de las secciones transversales de los cortes contra un disco abrasivo P240 en movimiento de una pulidora "Phoenix Beta", también de la casa Buehler. Después de empastillar las muestras en una prensa automática Buehler de la serie "Simpliment 2000", tuvo lugar la segunda fase del pulido con pasta abrasiva de diamante en una máquina "Digiprep 251" de Metkon, en tres estadios diferentes a su vez de pulimento. Posteriormente se atacaron con una disolución de ácido nítrico con una riqueza mínima del 60% en etanol, relación 1:10, para revelar o contrastar la penetración del metal de aporte en el material base. Por último, se examinó el perfil de cada sección de cordón embebida en la pastilla en un estereomicroscopio óptico Olympus de la serie "SZ-CTV" y se evaluó su constitución interior, determinándose al mismo tiempo cuantitativamente sus dimensiones.

Metodología propuesta

El objeto de este proyecto es valorar la eficiencia y la fortaleza del método de ultrasonidos para la inspección de soldaduras GMAW en uniones a solape de chapas finas de acero DX53D + Z100MB. La investigación presentada se basa en la siguiente cadena de ideas. Generalmente, una buena soldadura queda determinada o identificada por su microestructura y otra serie de factores como la cantidad de salpicaduras, la cantidad de exceso de llenado o de llenado insuficiente, etc. Aunque estos parámetros no se puedan medir o cuantificar fácilmente, sí se pueden relacionar con características del proceso como son la velocidad de enfriamiento del baño de soldadura, el modo de transferencia metálico, la geometría de la cabeza y la raíz del cordón, los defectos de la pieza de trabajo, etc.

En este sentido, el análisis ultrasónico se distingue por la posibilidad de obtener información de la microestructura y del tamaño de grano por un lado, y, por otro, de determinar longitudes y/o espesores de acuerdo con el tiempo de vuelo de la señal. En el caso de los materiales metálicos, la estructura cristalina de éstos provoca una gran dispersión de la onda ultrasónica, de forma que cuanto más elevada sea la frecuencia de muestreo, mayor es la dispersión experimentada. El tamaño de grano de dichos cristales se puede determinar a partir de la energía dispersada, puesto que existe una relación directa entre ambas magnitudes. Y con la información del tamaño de grano se puede distinguir a su vez entre las zonas fusionadas y/o afectadas por el calor en la soldadura de la del metal base.

Además de la observación o determinación de la estructura metalúrgica, cualquier heterogeneidad, ya sea un poro, una inclusión, la línea de fusión en una soldadura o el extremo opuesto de la pieza a ensayar, se traduce en una señal recibida por el transductor en un tiempo dado después de la incursión de la onda ultrasónica en el material. El tiempo de vuelo o de propagación de la onda ultrasónica a través del material permite determinar a su vez la posición exacta de esa discontinuidad o punto de reflexión. La amplitud del eco o del pico de la señal, por su parte, arroja una estimación acerca de sus dimensiones.

Si un control adecuado sobre las propiedades de la señal ultrasónica (tiempo de vuelo, amplitud y ruido) puede conseguirse, sería posible controlar la "bondad" de la soldadura y, en consecuencia,

4. Metodología propuesta

dominar el proceso de soldadura GMAW de forma no destructiva. Siguiendo estas ideas, nuestro enfoque para el control de la calidad de la soldadura en el proceso GMAW trata de valorar apropiadamente los parámetros de la señal de ultrasonidos con el fin de controlar posibles irregularidades y/o imperfecciones como la falta de fusión y, más específicamente, estimar el perfil geométrico del cordón y los valores de espesor de garganta, profundidad de penetración y anchura de la zona fusionada.

4.1 Técnica de pulso-eco

La caracterización y consiguiente diferenciación entre los patrones de señal provenientes de cada unión soldada se investigó usando la técnica de *pulso-eco con haz normal o haz recto* (directo). Los ensayos de haz normal utilizando transductores de contacto o de retardo de línea se emplean generalmente para encontrar reflectores paralelos a la superficie de la pieza de ensayo, tal como grietas, delaminaciones, huecos y/o poros. Se fundamenta en el principio básico de que la energía del sonido que viaja a través de un medio continuará propagándose hasta que o bien se disperse por completo dentro del propio medio o bien sea reflejada desde una interfaz, tal como el aire que rodea a la pared de fondo de la pieza o el aire que se encuentra retenido dentro de una grieta.

En este tipo de análisis, se acopla el transductor a la pieza de trabajo y se localiza el eco de retorno de la pared de fondo de dicha pieza, el cual corresponde con el espesor en ese punto, para, a continuación, buscar todos los ecos que llegan antes que el eco de fondo, no teniendo en cuenta el ruido de dispersión de grano. Un eco acústico significativo que precede al eco de fondo implica la presencia de un cambio sustancial en las características del material (grieta laminar, hueco, etc). Por medio de un análisis posterior, la profundidad, el tamaño y la forma de la estructura o elemento que produce la reflexión se puede llegar a determinar. En resumen, el ultrasonido viajará hasta el lado opuesto de la pieza a ensayar, pero será reflejado antes si se presenta en su recorrido con una discontinuidad o una irregularidad (ver figura 4.1).

Para esta investigación en particular, se va a adaptar la metodología descrita propia de la técnica pulso-eco con transductor de haz normal para el caso que nos ocupa, es decir, inspección de soldaduras con cordón en forma de solapa de chapas finas de acero de baja aleación galvanizado en caliente, con el transductor posicionado en contacto directo sobre el cordón de soldadura.

4.2 Eco de fondo

Siguiendo con este procedimiento, en primer lugar es necesaria pues la determinación o localización del eco de fondo. Para una única chapa de acero DX53D y espesor 1.9 mm, el patrón del eco de fondo es el que se muestra en la figura 4.2. Efectivamente, cuando el retardo de metacrilato solidario al transductor contacta firmemente con la muestra, el pulso inicial abandona

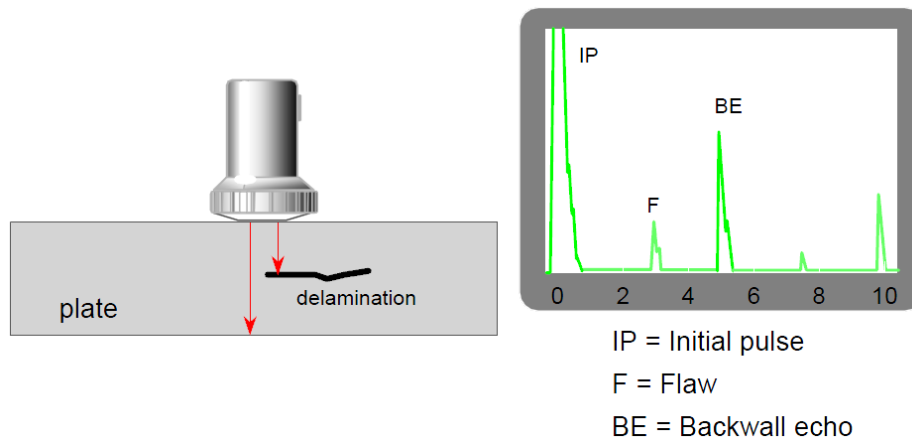


Fig. 4.1: Técnica de pulso-eco con transductor de haz normal. [24].

el transductor y pasa a través de dicho retardo y del gel de acoplamiento para penetrar a continuación en la pieza. Es entonces cuando se establece el "cero" del palpador en el equipo y de las mediciones en x . El ultrasonido se difunde a través del medio hasta que se topa con un cambio de material, la interfaz acero-aire concerniente a la pared opuesta de la chapa. Después de que el pulso de sonido se refleje desde la pared trasera y llegue a la cara frontal de la chapa, parte de él sale fuera de la pieza, obteniendo así el transductor el primer eco de fondo. El resto de la energía se refleja dentro del material una segunda vez hasta que se recibe el segundo eco de fondo, y así sucesivamente.

Como las superficies de la chapa son suficientemente planas y paralelas entre sí, se obtiene una secuencia muy clara de ecos de fondo, tal y como se puede ver en la figura 4.2, donde el ratio de amplitudes para un eco con respecto al anterior sigue una relación exponencial. Así, la diferencia entre longitudes de aparición de dos ecos consecutivos se corresponde con el espesor de la chapa.

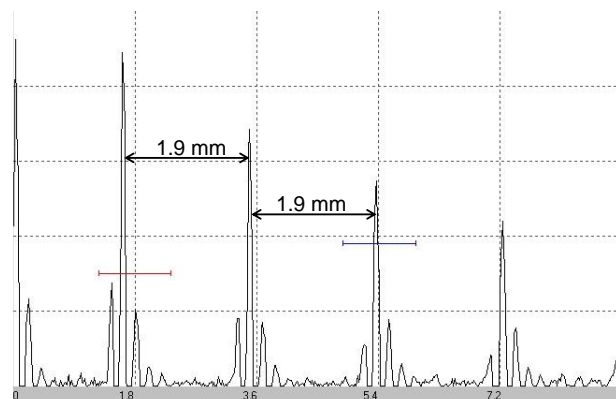


Fig. 4.2: Patrón de eco para una chapa de acero DX53D + Z100MB de espesor 1.9 mm (representación tipo A).

4. Metodología propuesta

Un cordón de solapa es aquel cordón de soldadura en el que las distintas piezas a unir se sitúan paralelas y solapadas entre sí y se sueldan por la cara frontal (ver figura 1.2(b)). Por lo tanto podría pensarse que el espesor teórico en la unión es la suma de los espesores respectivos de cada una de las dos chapas que, en nuestro caso, al tratarse de láminas de igual grosor, se corresponde con 3.8 mm. Por tanto, el eco de fondo aparecería a esa distancia (tiempo de vuelo) de la superficie del cordón. Esto sería así si la cara frontal del cordón se mantuviese en el mismo plano que la cara superior, valga la redundancia, de la chapa superior, es decir, si no mostraran los cordones los fenómenos característicos de concavidad y/o convexidad.

En realidad, el material de aporte se deposita y funde sobre la cara frontal formando entre la chapa superior y la inferior una cabeza delimitada por una curva de transición con forma más o menos abrupta-suave, es decir, más o menos convexa-cóncava respectivamente. En ningún caso, va a quedar esta línea curva contenida en ningún plano de ninguna de las superficies de las chapas que intervienen en la unión.

Por otro lado, un cordón de soldadura constituye un cambio en las propiedades de fase y de material con respecto al resto de la chapa base sin fundir y, por lo tanto, la línea de fusión de la soldadura se trata de un reflector del haz de ultrasonidos. Dado que la longitud de onda del ultrasonido es menor que la dimensión característica de cualquier material que se desee soldar por muy fino que éste sea, un pulso ultrasónico reflejado por la línea de fusión contiene información sobre la localización de esa interfase o frontera entre las áreas del material fundido y de base respectivamente.

En la zona afectada por el calor (HAZ por sus siglas en inglés) de la soldadura, la transición de fase sólida puede resultar en una gran variación en las propiedades del material suficiente para provocar múltiples reflexiones en el ultrasonido [31]. Si la magnitud de esta reflexión es grande, puede que no sea posible la transmisión del ultrasonido a través de la zona HAZ hacia el material de base. Por otro lado, si existen reflexiones relativamente pequeñas de la región HAZ, podría ser posible medir de manera independiente la posición de la línea de fusión de la soldadura y la ubicación de la cara opuesta a la superficie de ensayo de la chapa inferior. Así, análogamente al método de pulso-eco convencional o tradicional, el eco de fondo se correspondería con el extremo inferior de la chapa 2 y un eco relativamente significativo que lo precediese, con la línea de fusión o perfil del cordón de soldadura.

De esta forma, la técnica ultrasónica ofrece una alternativa para investigar la geometría de las soldaduras con cordón en forma de solapa. Los materiales de aporte y de base, aún no poseyendo la misma composición química, tal y como se puede comprobar en las tablas 3.6 y 3.1 respectivamente, presentan propiedades acústicas muy similares. Así, cuando el frente de ondas viaja a través del cordón hacia el área de la región soldada, al incidir con la línea de fusión, la mayor parte de la energía de esa onda se va a transmitir hacia el material base y una leve cantidad se va a reflejar de vuelta dentro del cordón, puesto que las impedancias acústicas de ambos medios son prácticamente iguales. Del mismo modo, al poseer también índices de refracción comunes,

4.3. Dimensión y geometría de una soldadura en cordón de solapa

por la ley de Snell, el ángulo de refracción R° en el material base es aproximadamente igual al ángulo de incidencia i° en el material fundido. Así, la porción de onda transmitida en el material base lo hace exactamente en la misma dirección que el haz incidente.

4.3 Dimensión y geometría de una soldadura en cordón de solapa

Para garantizar una unión soldada óptima no sólo es necesario un cordón ópticamente impecable en la posición correcta sobre el componente, sino que es preciso fijar requisitos mínimos en cuanto a la geometría y dimensión de la soldadura. Éstas quedan determinadas por la longitud del cordón, el espesor o garganta del cordón y la penetración del material de soldadura en el material base [11–13]. Por tanto es sobre estos parámetros sobre los que se deberá extraer información de la señal ultrasónica.

De forma general, para que una soldadura con cordón en forma de solapa sea óptima, en su sección transversal se ha de inscribir un triángulo isósceles rectilíneo con los dos lados iguales contenidos en cada una de las caras frontales de las dos piezas a unir, tal y como se muestra en la figura 4.3. El espesor del cordón se define entonces como la altura del máximo triángulo isósceles rectilíneo inscribible en la sección transversal del mismo.

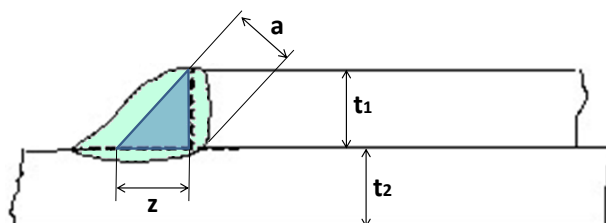


Fig. 4.3: Dimensiones de la sección transversal de un cordón de solapa, donde z es la longitud de los lados iguales del triángulo isósceles inscrito en él y a el espesor o garganta del cordón. z se corresponde con el espesor mínimo de las chapas.

El *espesor calculado del cordón de soldadura*, a , se necesita para poder calcular las fuerzas que actúan sobre una unión soldada. Para el dimensionado de un diseño en versión de cordón angular o de solapa, se aplica:

$$a \leq 0.7 \cdot t_{min} \quad (4.1)$$

donde:

- a Espesor teórico
- t_{min} Espesor mínimo de las chapas

4. Metodología propuesta

Así, los lados iguales del triángulo isósceles poseen una longitud igual al espesor de las chapas en el caso de que ambas posean el mismo grosor o del espesor mínimo en caso contrario.

En la fabricación, el *espesor de cordón de soldadura medido realmente*, s , tiene que ser siempre superior o igual que el espesor calculado del cordón a ($s \geq a$). En el caso de cordones de soldadura abombados no debe tenerse en cuenta, bajo ningún concepto, el resalte del cordón en ninguna de las formas de cordón (ver figura 4.4(b)).

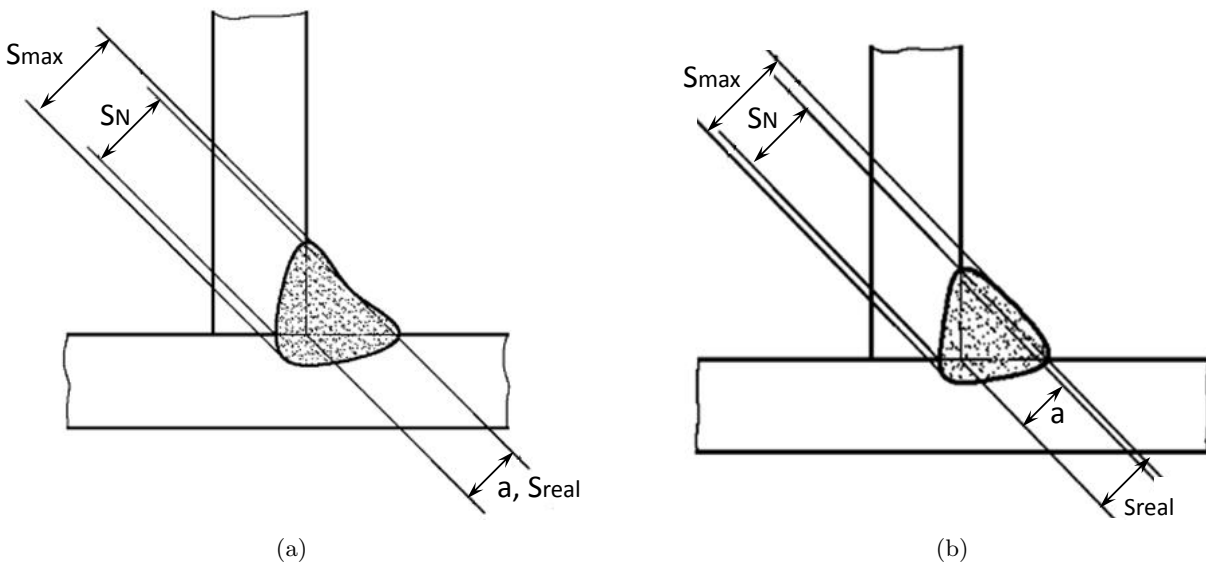


Fig. 4.4: Espesores de garganta para soldaduras en ángulo (a) cóncava y (b) convexa, donde S_{max} , a , S_{real} y S_N son respectivamente los espesores de garganta máximo, de diseño o calculado, real y efectivo [46].

Por otro lado, la unión de soldadura es suficiente si se realiza una unión cristalina ininterrumpida en toda la longitud de penetración, con una *profundidad de penetración*, f , mensurable $f \geq 0.2$ mm entre las chapas implicadas. El valor de medición de la profundidad de penetración puede determinarse en el lugar de mayor profundidad de penetración. Valores para la profundidad comprendidos entre 0.1 y 0.2 mm pueden ser aceptados, pero en ningún caso son aceptables profundidades de penetración inferiores a 0.1 mm.

Por último, se denomina *longitud de penetración*, b , a la anchura de la zona del cordón a lo largo del correspondiente plano de unión, en el que existe una junta cristalina y, por ello, portante. El requisito para la anchura del cordón se deduce geoméricamente del espesor del cordón. Dicho requisito establece que el espesor ejecutado del cordón tiene que ser $s \geq a$. De ello se desprende, conforme a la figura 4.5, para la anchura de penetración b ejecutada en el caso de cordones de solapa, el requisito:

$$b_2 \geq t_2 \quad (4.2)$$

4.4. Posicionamiento del transductor sobre el cordón

donde:

- b_2 Profundidad de penetración en la chapa 2 o chapa inferior
- t_2 Espesor de chapa 2 o chapa inferior

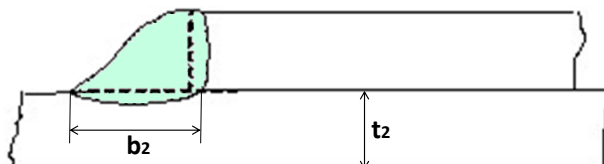


Fig. 4.5: Anchura de penetración b_2 en un cordón en forma de solapa [12].

En resumen, para un cordón de solapa los requisitos de espesor o garganta del cordón, profundidad y longitud de penetración son los que se recogen en la figura 4.6.

Así pues, para nuestro caso particular, el espesor de cordón real s deberá ser siempre mayor o igual que 1.33 mm, la profundidad de penetración f_2 mayor o igual que 0.2 mm y la anchura de penetración b_2 mayor o igual que 1.9 mm.

4.4 Posicionamiento del transductor sobre el cordón

Establecidas las referencias del eco de fondo y del eco de la línea de fusión para la inspección mediante ultrasonidos de un cordón de solapa desde su cara frontal y definidos los parámetros característicos de este tipo de unión soldada, se procederá a definir las posiciones del palpador sobre el cordón necesarias y suficientes con el fin de relacionar la señal de ultrasonidos con las magnitudes definitorias del cordón. Dichas posiciones quedan recogidas en la figura 4.7.

4.4.1 Posición A

El espesor teórico del cordón se calcula como la mínima distancia desde la intersección de los dos catetos iguales del triángulo isósceles inscrito en la sección transversal de la soldadura hasta la hipotenusa del mismo (ver figura 4.4). Por tanto, el espesor sigue una línea recta desde el punto de unión de los dos catetos, que coincide con el punto raíz de la soldadura, a 45° desde cualquiera de estos dos lados iguales. Así pues, es en el punto medio o central de la cabeza de la soldadura donde debe posicionarse el palpador para obtener una lectura proporcional al espesor ejecutado de la soldadura y apuntando en dirección hacia la línea de intersección entre las dos caras frontales de las chapas. Dicha orientación del palpador en la práctica se traduce como la normal a la tangente en el punto central de la cabeza de soldadura.

4. Metodología propuesta

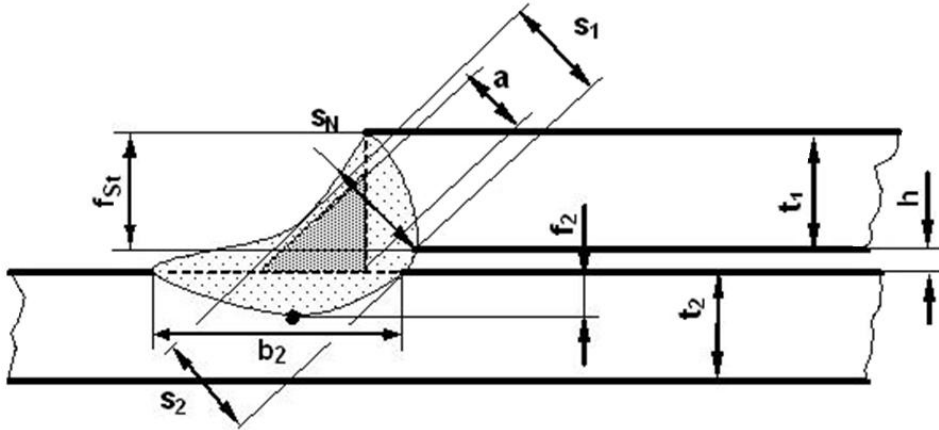


Fig. 4.6: Geometría del cordón de solapa, donde:

- $s_{1,2}$ Espesor de cordón
- s_n Espesor de cordón común más reducido
- a Espesor calculado de cordón
- f_2 Penetración lateral en el componente t_2
- f_{st} Afectación de superficies frontales $\geq 100\%$
- b_2 Anchura de penetración
- h Medida de separación
- $s_{1,2} \geq 0.7 \cdot t_{min}$
- $s_n \geq s_{1,2}$ y $s_n \geq 0.7 \cdot t_{min}$
- $a \leq 0.7 \cdot t_{min}$ (recomendación de diseño)
- $f \geq 0.2$ mm
- $b_2 \geq t_2$

La superficie frontal de la chapa superior tiene que estar fundida al 100%.

En caso de trayectoria de separación no paralela (chapa superior colocada en oblicuo) debe determinarse la medida de separación h sobre el punto de raíz.

En caso de que no puedan comprobarse fácilmente los espesores de cordón $s_{1,2}$ en la sección, es posible elegir como criterio sustitutivo el espesor de cordón común más reducido s_n .

De la definición dada en la sección anterior del espesor mínimo requerido para una soldadura consistente, si con esta localización y orientación del palpador, el eco de fondo, el cual se trata para este caso en particular de la reflexión del haz ultrasónico desde la raíz de la soldadura, aparece a una distancia igual o superior a 1.33 mm, estaremos ante una soldadura con un espesor de cordón suficiente. Esto es, la garganta del cordón se ha alcanzado. En caso contrario, o bien se ha dado con una imperfección tal como un poro o una grieta antes de llegar a la raíz, o el espesor de cordón es demasiado pequeño y no se ha logrado.

Ahora bien, el caso descrito corresponde a aquél en el que la superposición o el solapamiento entre las chapas a unir es perfecto, es decir, no existe ninguna separación entre ellas. Si por el contrario se da un determinado espacio entre ambas, el espesor de garganta mínimo requerido se verá incrementado en una cantidad proporcional a esa medida de separación entre chapas (ver

4.4. Posicionamiento del transductor sobre el cordón

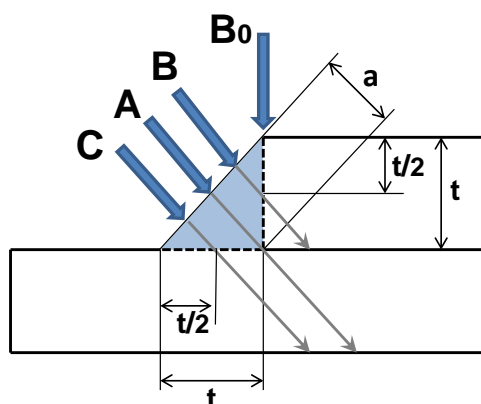


Fig. 4.7: Posiciones del transductor sobre el cordón de soldadura para la inspección del mismo: *A*, en el medio del cordón; *B₀* en la intersección entre el material fundido y la chapa superior 1; *B* hacia la chapa superior 1 (derecha del cordón según la configuración representada) y *C* hacia la chapa inferior 2 (izquierda del cordón en la imagen). En las cuatro posiciones la dirección de penetración del ultrasonido dentro del material es perpendicular a la tangente de la cabeza del cordón en el punto de contacto.

punto 3.2 de figura A.4 en anexo A).

La norma VW 01106-1: 2009-08 [12] establece para el grupo de calidad menos restrictivo D, relativo a uniones sometidas a esfuerzos reducidos, que esa medida de separación h entre chapas sea:

$$h \leq 0.5\text{mm} + 0.07 \cdot t \quad (4.3)$$

Donde h es, como ya hemos dicho, la medida de separación entre chapas y t el espesor de las mismas. La separación máxima permitida en nuestro análisis para que la soldadura siga siendo válida es de 0.63 mm. Teniendo en mente la geometría del triángulo isósceles, si el cateto contenido en la cara frontal aumenta su longitud en h (0.63 mm), la largura de ambos catetos pasa a ser de 2.53 mm y, en consecuencia, el espesor mínimo requerido o espesor teórico pasa a ser 1.77 mm. Por ello si el eco de fondo del punto raíz aparece a una distancia del cero del transductor superior a 1.77 mm se garantizará la consecución del espesor de cordón requerido en el supuesto más desfavorable de falta de contacto entre las chapas a soldar.

Generalmente los cordones en ángulo y, por tanto, en solapa, presentan en mayor o menor medida cierta asimetría debido a posibles reboses del material de aporte sobre las chapas base, la cual desplaza la línea del espesor bien hacia la chapa superior 1, bien hacia la chapa inferior 2. No obstante, para una aplicación real, vamos a despreciar este pequeño grado de disimetría y considerar el cordón perfectamente simétrico. Por tanto, el punto de inspección se mantiene en el punto central de la cabeza de soldadura. En cualquier caso, una pequeña comprobación desplazando ligeramente el palpador hacia la chapa superior 1 si la asimetría se produce hacia la chapa inferior 2, y viceversa, es decir, hacia la chapa inferior 2 si la asimetría se encuentra más próxima a la chapa superior 1, bastaría para comprobar el espesor del cordón.

4. Metodología propuesta

Destacar que en todo momento estamos hablando del punto medio de la cara frontal de la soldadura y no de una zona, área, región o superficie. La geometría real de la cabeza del cordón presenta en prácticamente todos los casos cierto grado de curvatura, en vez de constituirse en una superficie plana. Es por ello que la cabeza del palpador apoya sobre una mínima superficie muy localizada de la cara frontal de la cabeza o, en el peor de los casos, sobre un único punto. De cualquier forma, la totalidad del área de la cabeza bien del transductor, bien de la línea de retardo, nunca va a apoyar completamente sobre el cordón de soldadura. Por tanto, sólo una parte del haz ultrasónico generado por el elemento piezoeléctrico va a penetrar realmente en el cordón, perdiéndose el resto de la onda no transmitida en el hueco entre el palpador y el material. De ahí que bajo esta coyuntura la amplitud de la señal se debilita y sea necesario un ajuste preciso de la ganancia.

4.4.2 Posición B_0

Para constatar que la cara frontal de la chapa superior ha sufrido fusión y, por tanto, el material de aporte ha penetrado a lo largo de toda su longitud, es preciso colocar el transductor sobre el borde de la chapa superior, en la intersección entre el acero base y el material de aporte, y en dirección perpendicular a la chapa, de forma que el centro del frente de onda del sonido dentro del material siga o copie el borde de la chapa.

Si la afectación ha sido igual o superior al 100%, el eco de fondo se corresponderá con el punto raíz de la soldadura y, por tanto, aparecerá a una distancia igual o superior al espesor de la chapa superior (1.9 mm) respecto de la superficie de ensayo.

Una falta de fusión en ese flanco de la soldadura o en la raíz y, por ende, una falta de penetración no pueden ser vistas por el haz ultrasónico con esta posición del palpador, pues dichos defectos quedan en la misma dirección que el haz. Por ello, si un eco significativo se visualiza antes del espesor de la chapa, sólo puede corresponder con la línea de fusión de la soldadura, en ausencia de otros defectos. Si la línea de fusión en esa cara 1 no es perfectamente recta conforme a la vertical, sino que presenta cierta curvatura con grados indistintos de convexidad y/o concavidad, el haz ultrasónico también se verá reflejado por la línea de fusión. En este caso, también aparecerá un eco anterior al eco de la raíz, pero no por ello implicará que no se haya producido una afectación en la totalidad de la cara frontal 1.

En este mismo sentido, en la práctica, la parte del haz ultrasónico opuesta o más alejada a la zona de soldadura (derecha en la imagen 4.7), debido al diámetro del transductor, sólo va a ver en todo momento una única chapa, por lo que con mayor o menor amplitud (energía) siempre va a existir un eco a 1.9 mm correspondiente con el propio espesor de la chapa.

Unido a todo ello, en este tipo de soldaduras se suelen dar además con relativa frecuencia defectos de entalladura de penetración (mordedura) entre la superficie superior de la chapa 1 y el

4.4. Posicionamiento del transductor sobre el cordón

material de aporte y de derramamiento del material soldado (ver puntos 1.7 y 1.14 de figura A.4 en anexo A), ocasionando ángulos de transición entre ambas estructuras excesivamente abruptos, e imposibilitando por tanto el posicionamiento del transductor sobre la superficie.

Por último, pero no por ello menos importante, tras la ejecución de la soldadura no se posee conocimiento acerca de la ubicación exacta del borde de la chapa 1. A simple vista se es capaz de determinar la frontera entre el material de base y el material de aporte, pero si se ha producido, por ejemplo, un solapamiento de material sobre esa superficie, se pierde cualquier control sobre la situación real de la cara frontal 1 de la soldadura.

Por todo ello, no resulta factible obtener información con este posicionamiento del transductor y, en el caso de que físicamente no existiese impedimento alguno para que así lo fuera, la señal obtenida tampoco sería fiable debido a los motivos expuestos. Queda demostrada pues la inviabilidad del análisis ultrasónico de los cordones de solapa en esta posición.

4.4.3 Posición B

La siguiente posición del transductor a definir va a tener el punto de apoyo sobre el cordón en un punto próximo a la chapa superior 1, y como en el primer caso, la orientación del haz va ser en dirección perpendicular a la tangente de la superficie del cordón en el punto de contacto.

Guiándonos una vez más por las razones geométricas propias del triángulo isósceles descritas en la figura 4.3, si se traza una línea perpendicular a la hipotenusa del triángulo isósceles en el punto intermedio entre el punto central del cordón y la chapa 1 hasta el cateto vertical contenido en la cara frontal de la chapa 1, se obtiene una longitud igual a 0.67 mm ($0.7 \cdot t/2$), la cual corresponde, aproximadamente, con la línea de fusión. Si el haz ultrasónico no sufre una reflexión muy elevada en esta interfase, se transmitirá en el interior de la chapa 1 hasta que interfiera con la pared de fondo, habiendo viajado en el material base un distancia igual a $1.14 \cdot t/2$, es decir, 1.34 mm . Con lo cual, a una distancia total de 2.01 mm desde el punto de incidencia del haz ultrasónico en el cordón aparecerá el eco de fondo.

Por tanto, siempre que aparezca el eco de fondo a una distancia mayor o igual que 2.01 mm , estaremos ante un caso de soldadura óptima en la cara frontal 1. En caso de aparecer a un distancia muy superior a esos 2.01 mm estaremos ante un cordón con abombamiento o grado de convexidad elevado. Bajo esa circunstancia puede incluso que la dirección del haz ultrasónico dentro del cordón sea conforme a la vertical, es decir, perpendicular a la superficie de ensayo de las chapas, con lo que realmente estaremos en la situación descrita en 4.4.2. Es decir, que en caso de rebose de cordón, las posiciones B_0 y B coinciden.

Si además un eco significativo precede al eco de fondo y lo hace a más de 0.67 mm en ese punto, nos reafirmará que dicha cara frontal ha experimentado fusión. Esta posición del transductor se trata pues de una alternativa a B_0 para evaluar la afectación de la cara frontal de la chapa

4. Metodología propuesta

superior. Si aparece el pico correspondiente a la línea de fusión a una distancia muy superior al valor previsto nos estará indicando que la penetración del baño de soldadura en la chapa 1 ha sido elevada, lo que nos da una idea de solapamiento con fusión o derramamiento del material sobre esa cara superior de la chapa 1.

Por último, si el eco significativo correspondiente con la línea de fusión presenta una amplitud considerable independientemente de su posición, llegando incluso a ser superior al eco de fondo, es síntoma de falta de fusión en ese flanco de la soldadura, dado que la mayor parte de la energía de la onda se ha visto reflejada de vuelta y no se ha transmitido dentro de la chapa 1.

4.4.4 Posición C

Similar a la posición B, la última posición del transductor a tratar, se va a apoyar sobre el cordón conforme a la perpendicular a la tangente, pero esta vez en un punto de la cabeza del cordón cercano a la chapa inferior 2; concretamente en el punto intermedio entre el punto medio del cordón y la intersección entre el propio cordón y la chapa 2.

El análisis es completamente análogo al caso anterior. Así, pues si se traza una línea recta perpendicular a la hipotenusa del triángulo isósceles inscrito en el cordón en el punto intermedio entre el punto central del cordón y la chapa 2 hasta que interseca con el cateto horizontal, se obtiene una longitud igual a 0.67 mm ($0.7 \cdot t/2$), la cual correspondería con la línea de fusión sin penetración en la chapa inferior.

En la sección anterior se ha descrito la necesidad de una profundidad de penetración f_2 del material de aporte en el material base de la chapa 2 mínima de 0.2 mm conforme a la vertical, por lo que la distancia mínima para la línea de fusión en la dirección C (formando 45° con la vertical) se ve aumentada en 0.29 mm hasta 0.96 mm , siempre y cuando la superposición o el solapamiento entre las chapas a unir sea perfecto. Si por el contrario existe espacio entre ambas, la longitud en la dirección del haz a 45° desde el cordón de soldadura en la posición C se verá incrementada en una medida proporcional a la separación entre chapas, de manera análoga a como sucedía en A. De acuerdo con 4.3 la máxima separación permitida para un espesor de chapas de 1.9 mm es de 0.63 mm en la vertical. Ello supone para la soldadura en la chapa 2 una penetración aún mayor en una distancia mínima de $0.7 \cdot 0.63 \text{ mm}$, 0.44 mm .

Por tanto, sumando la mitad del espesor mínimo teórico requerido del cordón (0.67 mm), la profundidad de penetración mínima requerida (0.29 mm) y la máxima separación de chapas permitida (0.44 mm), se obtiene una longitud mínima de 1.40 mm para la aparición del eco correspondiente a la línea de fusión.

Por todo ello, si el eco de fondo de acuerdo con este posicionamiento del transductor se halla entre 0.96 y 1.40 mm estaremos ante un cordón de soldadura válido. Si un eco significativo aparece con anterioridad, indicará la existencia de alguna imperfección tal como poros, grietas,

4.4. Posicionamiento del transductor sobre el cordón

falta de unión en el flanco de la chapa 2 o una profundidad de penetración en esa chapa inferior insuficiente.

Si el eco surge a una distancia mayor que la calculada desde el punto de penetración en el material puede ser debido a varias causas. En primer lugar debido de un grado de abombamiento o de convexidad excesivo del cordón. En segundo lugar, a que la separación entre chapas o la oblicuidad de la chapa superior respecto de la inferior sea mayor que los límites establecidos (0.63 mm) y, por último, a la existencia de un sobreespesor o un recrecido de raíz por la pared de fondo de la chapa inferior 2. Mientras que en el primero de los casos, la norma no establece ningún tipo de valoración o limitación para un abombamiento excesivo siempre y cuando no genere ángulos de transición abruptos en los extremos, las otras dos situaciones sí que pueden derivar en una soldadura defectuosa. Dicho esto, el dilema en la práctica reside en que con esta metodología no se va a ser capaz de discernir entre diversas causas.

A pesar de que la norma tolera cierto grado de recrecido de la raíz desde el punto de vista estructural y/o mecánico de la soldadura, en la práctica no se va a permitir ningún rebose de material por la pared de fondo de la chapa 2, al imposibilitar posteriores trabajos de montaje sobre las chapas. Aglutinando el conjunto de condiciones, es decir aunando la mitad del espesor de garganta mínimo requerido del cordón (0.67 mm), la separación máxima entre chapas permitida (0.44 mm) y el espesor de la chapa inferior 2 en diagonal que corresponde con la hipotenusa del triángulo isósceles inscrito en el cordón (2.69 mm), obtenemos una longitud permisible para el eco de fondo de 3.80 mm. Si un eco significativo se presenta a una distancia superior a 3.80 mm, el material fundido habrá sobrepasado la pared de fondo de la chapa 2 y, por tanto, la soldadura será defectuosa.

Destacar que con esta metodología una cuantificación aproximada tanto de la longitud o anchura de penetración b_2 , como de la profundidad de penetración f_2 , no es posible. Dichos parámetros son determinables de forma estimativa con el empleo de uno o dos transductores angulares a cada lado del cordón, en los modos de pulso-eco y transmisión respectivamente, y con el empleo de un único transductor de haz recto o normal en modo pulso-eco, como en nuestra investigación, pero accediendo al elemento de ensayo desde la cara opuesta a la soldadura, es decir, desde la pared de fondo de la chapa inferior 2.

A lo largo del desarrollo de la metodología propuesta, dado que el equipo de ultrasonidos "SpotChecker" empleado en la investigación trabaja directamente con las magnitudes de espacio y amplitud de la señal, se han descrito las posiciones de los sucesivos ecos o picos con referencia a la distancia o longitud desde el cero del palpador, es decir, desde el punto de contacto del retardo de metacrilato con la cabeza del cordón. O lo que es lo mismo, dicho de otro modo, desde que el ultrasonido irrumpe en el cordón de soldadura. En el modo de pulso-eco, tal y como se vio en 3.3, los parámetros de distancia recorrida por el haz ultrasónico y tiempo de vuelo empleado para

4. Metodología propuesta

recorrer esa trayectoria están relacionados a través de la velocidad de propagación del ultrasonido en el medio de acuerdo con:

$$2d = \frac{v}{t} \quad (4.4)$$

Donde d es la mitad de la trayectoria recorrida por el sonido o la distancia desde el punto de penetración del sonido en el material hasta el reflector, t el tiempo de vuelo y v la velocidad del sonido en el medio, nuestro caso acero suave-medio de baja aleación.

Por ello, aunque en todo momento se haya hablado de la distancia recorrida por el ultrasonido desde el momento en que es introducido en el material hasta que se encuentra con un reflector, es indistinto hablar del tiempo de vuelo o de propagación que el sonido invierte en realizar esa trayectoria. La metodología es de igual forma válida y aplicable con el tiempo de vuelo como magnitud de referencia.

Resultados y Discusión

En el desarrollo de este capítulo final de resultados y discusión, descrita ya la metodología a emplear, se presentará en primer lugar el análisis ultrasónico de las distintas probetas de soldadura, con la valoración de las propiedades de las señales obtenidas. A continuación de mostrará el examen metalográfico de las mismas para, por último, comparar los resultados del ensayo ultrasónico con los obtenidos por métodos invasivos o destructivos y validar así la fiabilidad del método propuesto.

5.1 Análisis ultrasónico

A continuación se procede a aplicar la metodología descrita en la sección anterior a las muestras de soldadura con cordón en forma de solapa elaboradas según 3.2 conforme a los supuestos de penetración insuficiente, penetración excesiva o pandeo de la raíz sobre la parte posterior de la unión, porosidad y soldadura óptima.

Las fotografías macroscópicas de las muestras soldadas, se muestran en la figura 5.1. En esta figura, se observa que las superficies de las chapas soldadas están limpias y en estado óptimo. En cambio, las superficies de las cabezas de los cordones presentan en determinadas situaciones defectos típicos de la soldadura GMAW, como pequeños poros, hendiduras, inclusiones o el denominado efecto de "aguas". Son los casos que se dan, por ejemplo, en los cordones 3.3, 4.3 y 6.2, tal y como se puede observar en la figura 5.2.

Esta es una de las principales razones por las que el análisis ultrasónico de soldaduras en contacto directo del palpador sobre el cordón no se ha llevado a cabo hasta ahora. Estos defectos superficiales inherentes al proceso de soldadura implican un elevado grado de rugosidad. Por otro lado, la envoltura de la cabeza del cordón está contenida prácticamente en la totalidad de los casos en una superficie curva y no en un plano, bien sea por concavidad y/o convexidad del cordón. Como resultado de este hecho junto a la elevada rugosidad, se van a producir pequeños huecos entre el palpador (retardo en nuestro estudio) y el cordón de soldadura, ocasionando una

5. Resultados y Discusión

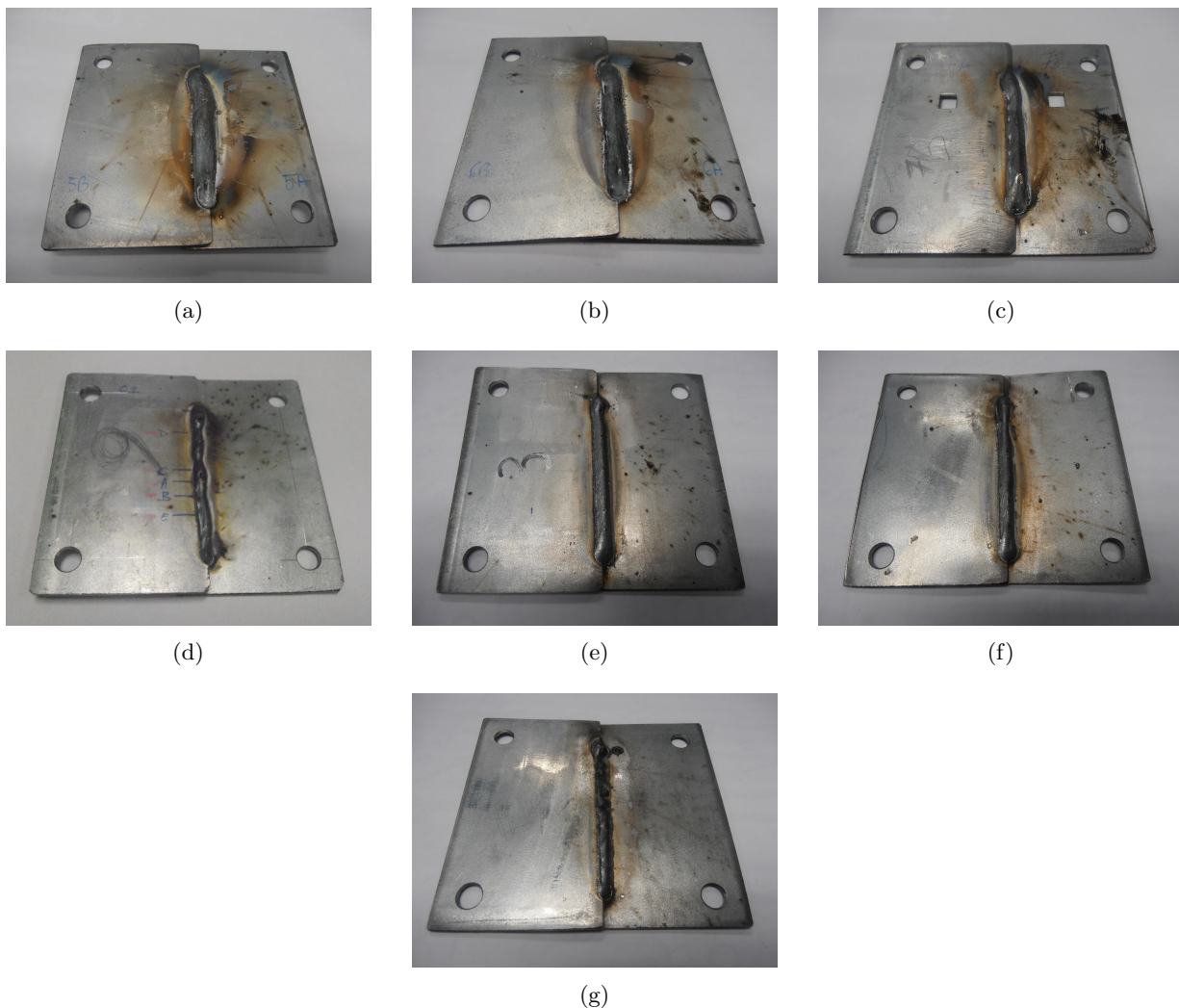


Fig. 5.1: Fotografías macroscópicas de las muestras soldadas (a) 5.1, (b) 6.1, (c) 7.1, (d) 6.2, (e) 3.3, (f) 4.3 y (g) 5.3.

sucesión de picos al inicio de la señal, como si de una serie de reverberaciones se tratara. De ahí también la importancia del medio de acoplamiento, en el sentido de la necesidad de empleo de un acoplante con el suficiente grado de viscosidad para rellenar estos huecos, y que así una mayor proporción de la energía del sonido sea capaz de penetrar dentro del material.

Así pues, la zona de soldadura descartando los extremos del cordón conforme a la sección 3.3, es considerada para la medición de perfiles. El cordón de soldadura se examinó a fondo utilizando la técnica de ultrasonidos con haz longitudinal y de acuerdo a una representación tipo A para identificar la solidez de la soldadura.

El A-Scan, como se vio en apartados anteriores, es una representación unidimensional que

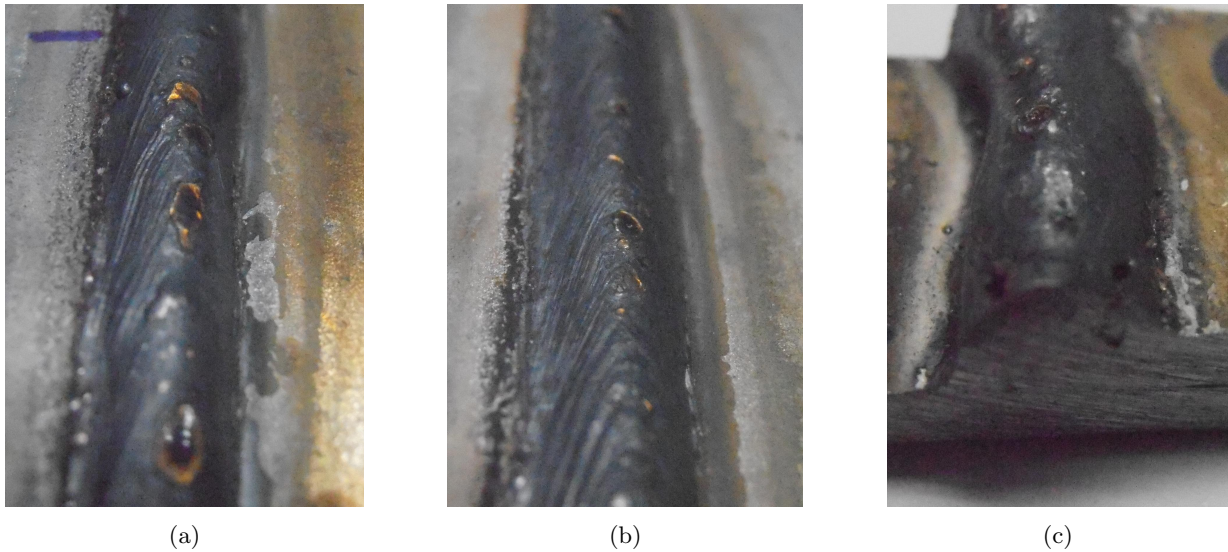


Fig. 5.2: Defectología superficial característica de la soldadura GMAW en los cordones de las muestras soldadas. (a) Inclusiones, (b) aguas y (c) poros.

muestra la existencia de reflectores, sus posiciones (según el tiempo de vuelo de la señal), y otorga también una estimación de su tamaño (en base a la amplitud del eco). En las figuras 5.3-5.9 se muestran los resultados obtenidos del análisis ultrasónico para los puntos de inspección en cada una de las muestras y de acuerdo a las posiciones del transductor descritas en el apartado anterior, indicando para cada medición, la posición y la amplitud de los ecos obtenidos en dichos A-Scans.

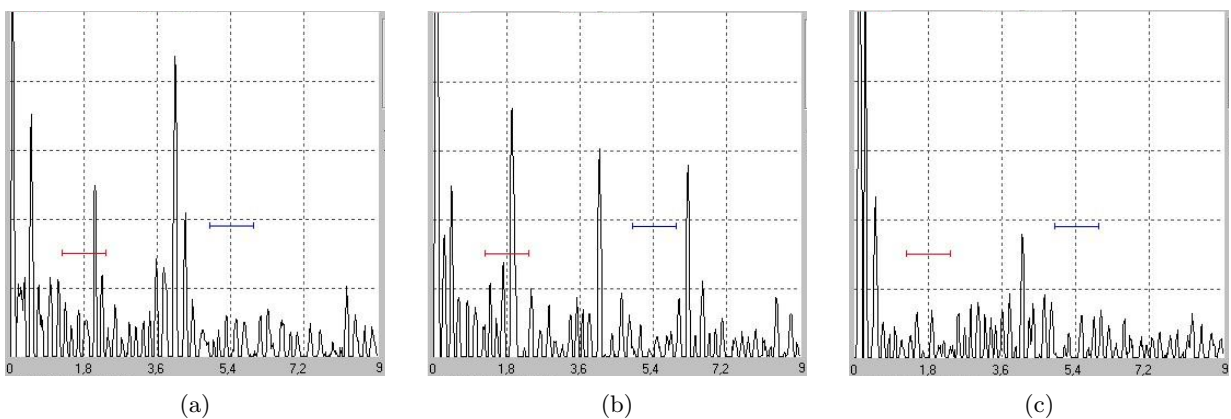


Fig. 5.3: Resultados del análisis ultrasónico en 3.3Y para las posiciones de palpador A, B y C respectivamente (ganancia 74 dB). (a) Eco 1. Pos.: 0.51 mm/Amp.: 705 dB. Eco 2. Pos.: 2.17 mm/Amp. 489 dB. Eco 3. Pos.: 4.17 mm/Amp.: 874 dB. (b) Eco 1. Pos.: 0.44 mm/Amp.: 497 dB. Eco 2. Pos.: 1.94 mm/Amp.: 725 dB. Eco 3. Pos.: 4.09 mm/Amp.: 607 dB. Eco 4. Pos.: 6.27 mm/Amp.: 558 dB.(c) Eco 1. Pos.: 0.53 mm/Amp.: 465 dB. Eco 2. Pos.: 4.10 mm/Amp.: 357 dB.

5. Resultados y Discusión

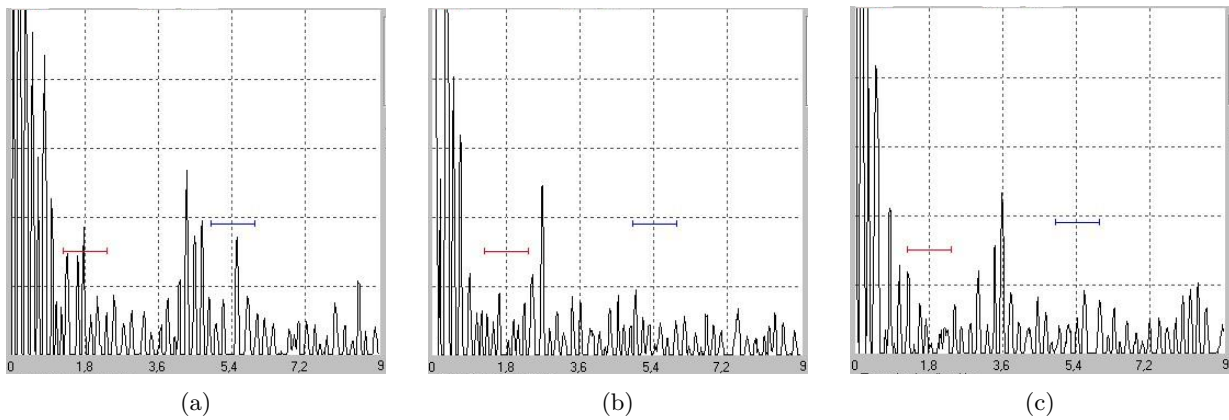


Fig. 5.4: Resultados del análisis ultrasónico en 7.1Y para las posiciones de palpador A, B y C respectivamente (ganancia 74 dB). (a) Eco 1. Pos.: 1.78 mm/Amp.: 370 dB. Eco 2. Pos.: 4.30 mm/Amp.: 538 dB. Eco 3. Pos.: 5.53 mm/Amp.: 342 dB. (b) Eco 1. Pos.: 2.57 mm/Amp.: 492 dB. (c) Eco 1. Pos.: 0.85 mm/Amp.: 421 dB. Eco 2. Pos.: 3.59 mm/Amp.: 465 dB.

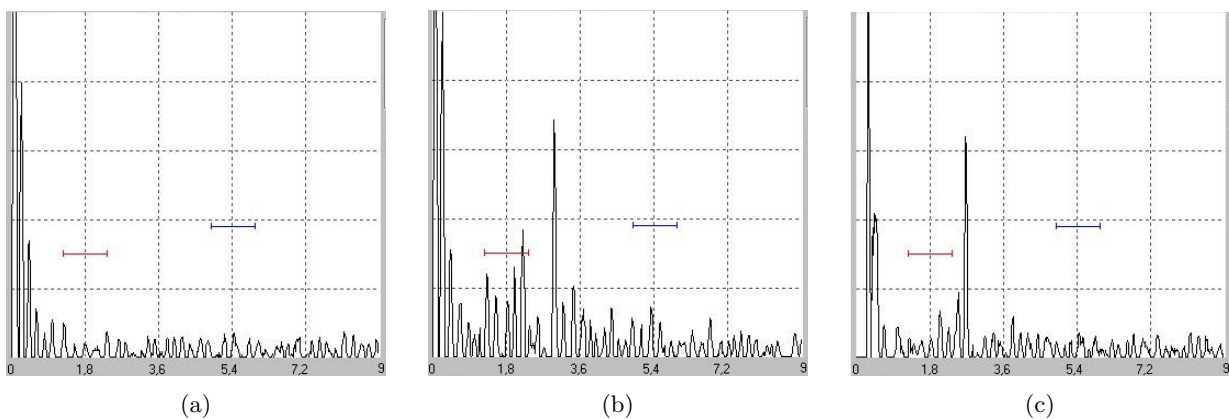


Fig. 5.5: Resultados del análisis ultrasónico en 4.3Y para las posiciones de palpador A, B y C respectivamente (ganancia 66 dB). (a) No existen ecos significativos. (b) Eco 1. Pos.: 2.20 mm/Amp.: 368 dB. Eco 2. Pos.: 2.98 mm/Amp.: 686 dB. (c) Eco 1. Pos.: 0.36 mm/Amp.: 1023 dB. Eco 2. Pos.: 2.68 mm/Amp.: 643 dB. Eco 3. Pos.: 3.84 mm/Amp.: 118 dB.

Los resultados obtenidos de forma global y sin particularizar para cada caso específico muestran claramente dos situaciones. La primera de ellas es que, efectivamente la inspección interior del cordón de soldadura se puede realizar en tres pasadas. El transductor empleado junto con el retardo posee un diámetro de 5 mm y genera una onda longitudinal de 90° . Al posicionar el palpador de forma que la normal coincide con la perpendicular a la tangente en cada punto de inspección del cordón, se transmite una única onda también longitudinal dentro del material. Las reflexiones, ya sean de la línea de fusión o de la pared de fondo de la chapa 2, proceden de un haz de ondas longitudinales. El haz longitudinal del transductor es capaz de "iluminar" en diámetro de 5 mm una zona vertical de más de dos veces el espesor de las chapas (3.8 mm), incluso cuando

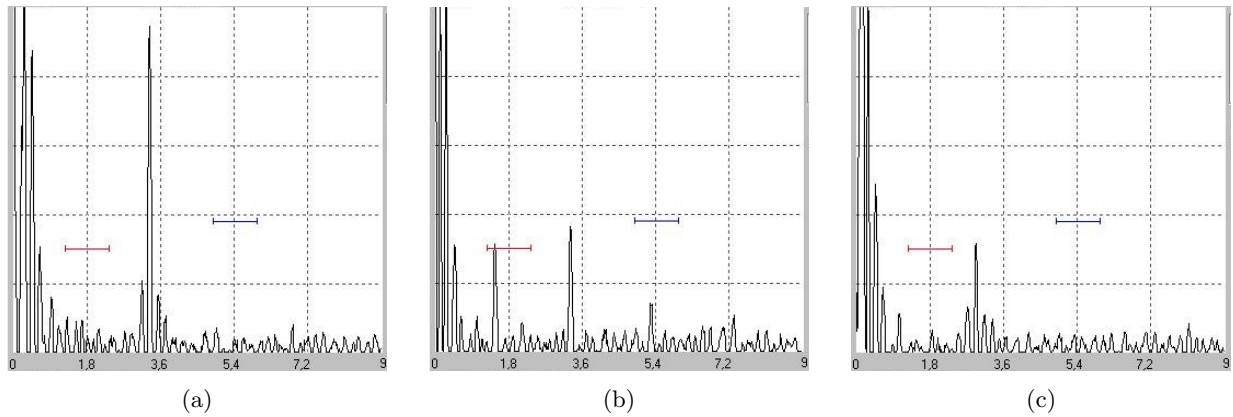


Fig. 5.6: Resultados del análisis ultrasónico en 7.1X para las posiciones de palpador A, B y C respectivamente (ganancia 66 dB). (a) Eco 1. Pos.: 3.35 mm/Amp.: 946 dB. (b) Eco 1. Pos.: 1.46 mm/Amp.: 313 dB. Eco 2. Pos.: 3.31 mm/Amp.: 365 dB. Eco 3. Pos.: 5.28 mm/Amp.: 143 dB. Eco 4. Pos.: 7.33 mm/Amp.: 106 dB. (c) Eco 1. Pos.: 1.06 mm/Amp.: 113 dB. Eco 2. Pos.: 2.94 mm/Amp.: 317 dB.

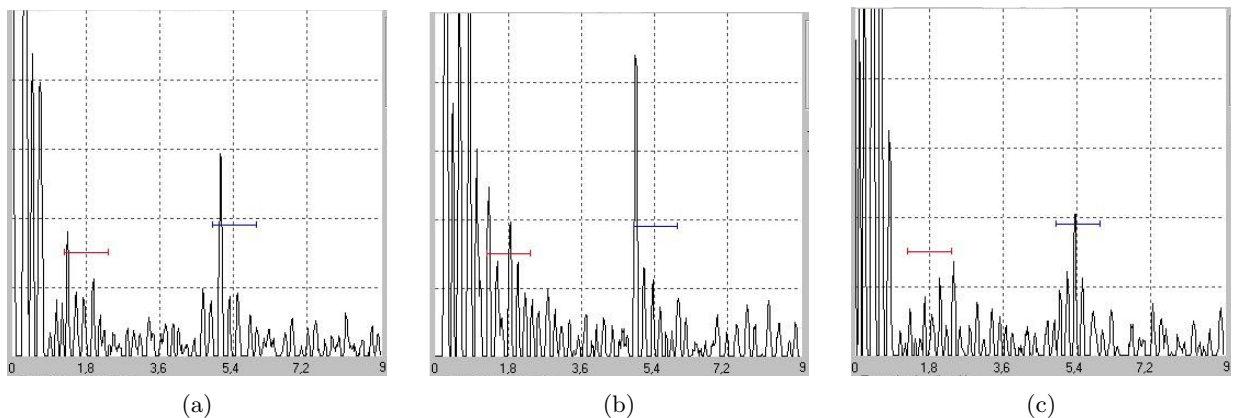


Fig. 5.7: Resultados del análisis ultrasónico en 6.1X para las posiciones de palpador A, B y C respectivamente (ganancia 74 dB). (a) Eco 1. Pos.: 1.36 mm/Amp.: 363 dB. Eco 2. Pos.: 5.09 mm/Amp.: 586 dB. (b) Eco 1. Pos.: 1.87 mm/Amp.: 394 dB. Eco 2. Pos.: 4.96 mm/Amp.: 881 dB. (c) Eco 1. Pos.: 2.40 mm/Amp.: 273 dB. Eco 2. Pos.: 5.35 mm/Amp.: 409 dB.

se obstaculiza la propagación del haz. Esto implica que el haz ultrasónico, desde los tres puntos de incidencia, cubre la totalidad del área de la región soldada.

En segundo lugar, de las señales obtenidas, en los primeros ecos se observa ruido o, como se les denomina también, señales "hierba" junto con el propio pico, lo que implica una estructura de grano más grueso correspondiente con la zona de fusión y la zona afectada por el calor. Por lo tanto, este hecho nos va a permitir distinguir entre los ecos que proceden de la línea de fusión y los que provienen de la pared de fondo de las chapas, principalmente de la placa inferior.

5. Resultados y Discusión

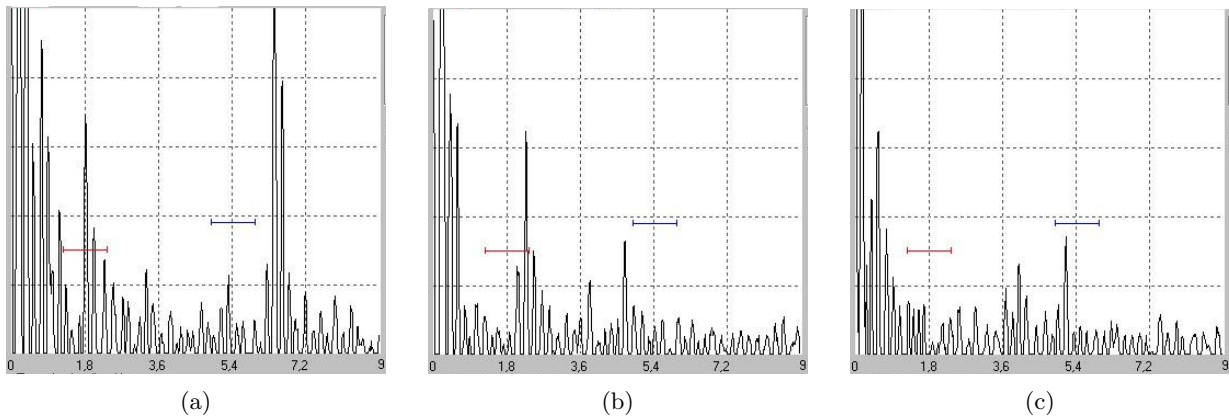


Fig. 5.8: Resultados del análisis ultrasónico en 5.1X para las posiciones de palpador A, B y C respectivamente (ganancia 74 dB). (a) Eco 1. Pos.: 1.81 mm/Amp.: 694 dB. Eco 2. Pos.: 5.73 mm/Amp.: 1023 dB. (b) Eco 1. Pos.: 2.27 mm/Amp.: 648 dB. Eco 2. Pos.: 3.84 mm/Amp.: 215 dB. Eco 3. Pos.: 4.70 mm/Amp.: 331 dB. (c) Eco 1. Pos.: 0.56 mm/Amp.: 648 dB. Eco 2. Pos.: 4.02 mm/Amp.: 264 dB. Eco 3. Pos.: 5.18 mm/Amp.: 343 dB.

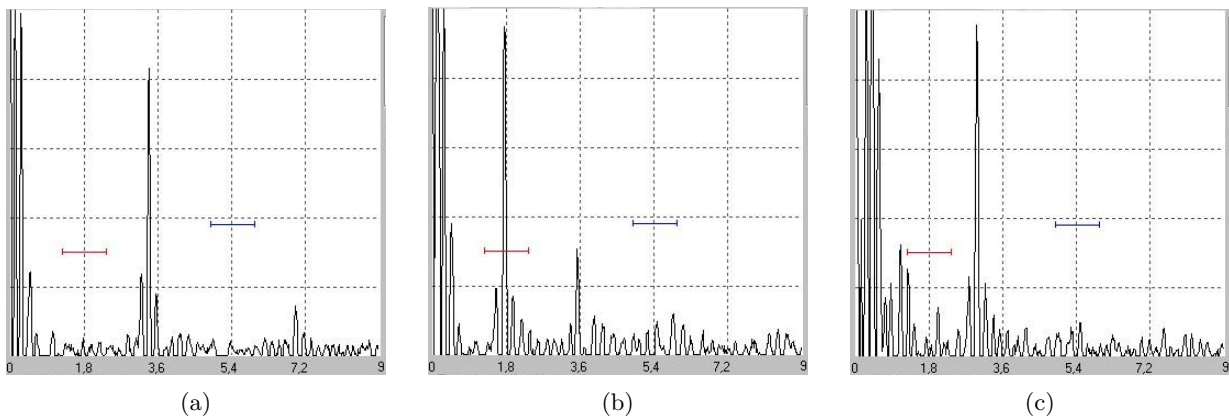


Fig. 5.9: Resultados del análisis ultrasónico en 5.1Y para las posiciones de palpador A, B y C respectivamente (ganancia 66 dB). (a) Eco 1. Pos.: 3.38 mm/Amp.: 834 dB. Eco 2. Pos.: 6.97 mm/Amp.: 396 dB. (b) Eco 1. Pos.: 1.76 mm/Amp.: 950 dB. Eco 2. Pos.: 3.54 mm/Amp.: 308 dB. (c) Eco 1. Pos.: 1.11 mm/Amp.: 323 dB. Eco 2. Pos.: 2.98 mm/Amp.: 960 dB.

5.2 Análisis metalográfico

Completado el análisis por ultrasonidos, se procede a la verificación de la constatación interior de las uniones soldadas así como de su geometría. Para ello se practica una sección transversal en los puntos donde se tomaron las señales ultrasónicas de acuerdo con el procedimiento descrito en 3.4. Mediante el análisis en el microscopio óptico, se evalúa el perfil del cordón. Las micrografías del perfil del cordón, con sus respectivos valores de espesor de cordón, profundidad y anchura de penetración, se presentan en la figura 5.13. La línea de fusión es claramente visible en todas

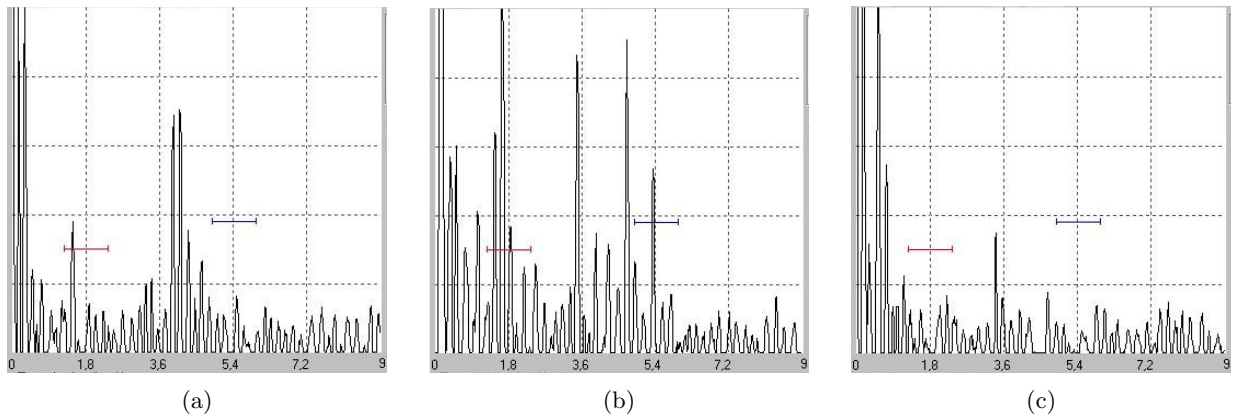


Fig. 5.10: Resultados del análisis ultrasónico en 5.3X para las posiciones de palpador A, B y C respectivamente (ganancia 74 dB). (a) Eco 1. Pos.: 1.48 mm/Amp.: 382 dB. Eco 2. Pos.: 4.10 mm/Amp.: 707 dB. (b) Eco 1. Pos.: 1.04 mm/Amp.: 414 dB. Eco 2. Pos.: 1.65 mm/Amp.: 1023 dB. Eco 3. Pos.: 3.49 mm/Amp.: 868 dB. Eco 4. Pos.: 4.72 mm/Amp.: 913 dB. Eco 5. Pos.: 5.35 mm/Amp.: 537 dB. (c) Eco 1. Pos.: 0.53 mm/Amp.: 1023 dB. Eco 2. Pos.: 1.16 mm/Amp.: 223 dB. Eco 3. Pos.: 3.42 mm/Amp.: 350 dB.

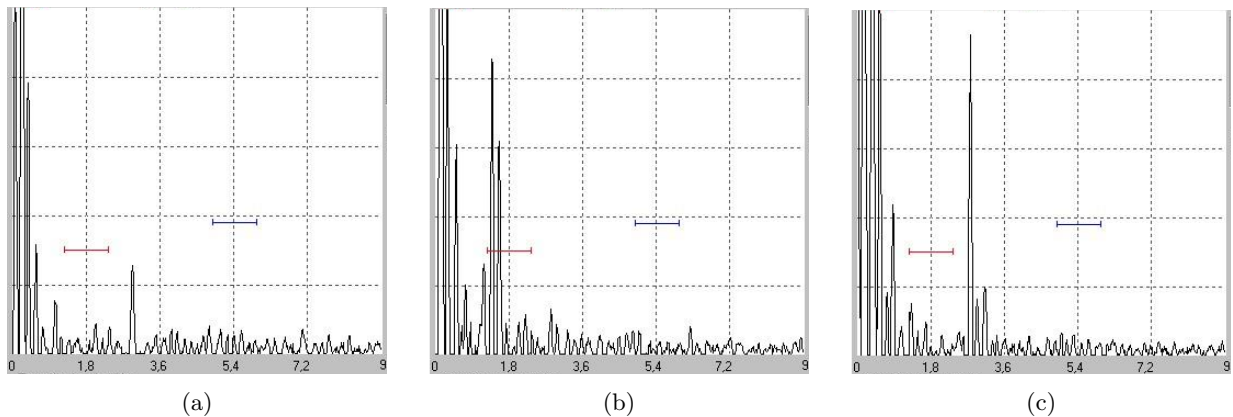


Fig. 5.11: Resultados del análisis ultrasónico en 3.3X para las posiciones de palpador A, B y C respectivamente (ganancia 66 dB). (a) Eco 1. Pos.: 1.04 mm/Amp.: 155 dB. Eco 2. Pos.: 2.94 mm/Amp.: 257 dB. (b) Eco 1. Pos.: 1.48 mm/Amp.: 859 dB. (c) Eco 1. Pos.: 0.88 mm/Amp.: 438 dB. Eco 2. Pos.: 1.32 mm/Amp.: 150 dB. Eco 3. Pos.: 2.77 mm/Amp.: 931 dB.

las micrografías, determinando de forma inequívoca las zonas sin afectar del material base y la región soldada.

El ensayo de la geometría del cordón y la valoración de las características de la constatación interior se realiza según las normas DIN EN ISO 5817:2009 [11], VW 01106-1: 2009-08 [12] y PV 6728: 2009-08 [13]. Un resumen de los grupos de valoración y de los valores límite para imperfecciones en este tipo de soldaduras se especifican en el anexo A, teniendo en cuenta que en la totalidad de los casos la forma del cordón es en solapa (cordón angular en junta de solape con

5. Resultados y Discusión

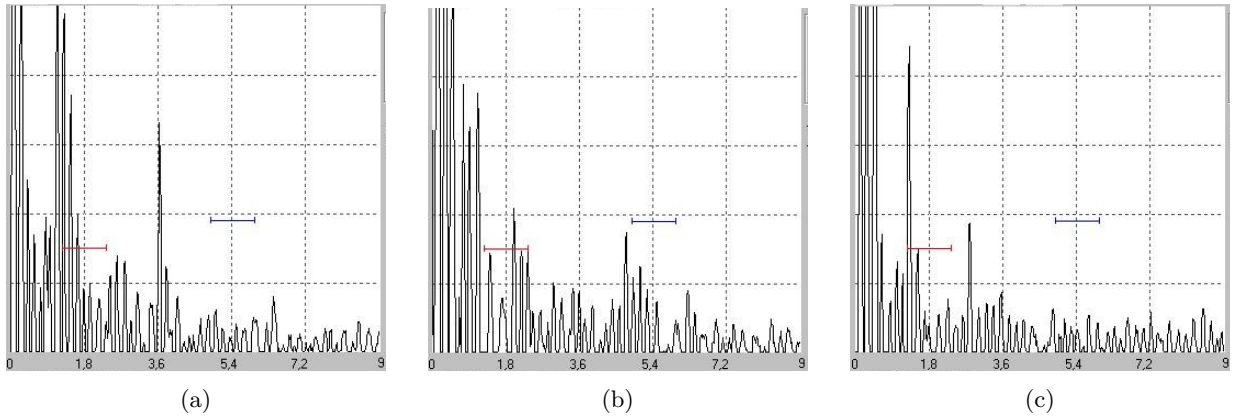


Fig. 5.12: Resultados del análisis ultrasónico en 6.2X para las posiciones de palpador A, B y C respectivamente (ganancia 74 dB). (a) Eco 1. Pos.: 1.45 mm/Amp.: 1023 dB. Eco 2. Pos.: 3.65 mm/Amp.: 663 dB. (b) Eco 1. Pos.: 2.01 mm/Amp.: 419 dB. Eco 2. Pos.: 4.77 mm/Amp.: 348 dB. (c) Eco 1. Pos.: 1.32 mm/Amp.: 888 dB. Eco 2. Pos.: 2.80 mm/Amp.: 373 dB.

la cara frontal de la chapa superior fundida completamente).

De las micrografías de los cordones 5.13(a) y 5.13(b) se puede constatar que las muestras 3.3Y y 7.1Y corresponden con un perfil óptimo de soldadura, la segunda de ellas con un marcado abombamiento o grado de convexidad. Por su parte las muestras 6.1X y 5.1X corresponden en 5.13(i) y 5.13(c) respectivamente con soldaduras con un gran recrecido de la raíz. La segunda de ellas presenta también cierto abombamiento del cordón. En 5.13(d) puede comprobarse como la profundidad de penetración en 5.3X es insuficiente y en 5.13(e) como el espesor de cordón en 3.3X también es insuficiente. En este último caso el cordón se rectificó en varias pasadas antes de realizar el estudio para simular un caso de soldadura cóncava con espesor de cordón insuficiente. En 5.13(f) correspondiente con la muestra 6.2X se muestra una situación de porosidad interna. Por último, las micrografías 5.13(g), 5.13(h) y 5.13(j), muestras 7.1X, 4.3Y y 5.1Y de forma respectiva, presentan cordones en los que se ha eliminado el abombamiento del cordón, las dos primeras de ellas siendo la soldadura buena, y, la tercera de ellas, presentando recrecido o sobreespesor en la raíz.

Como se vió en 4.3, los requisitos mínimos en cuanto a la geometría y dimensión de una soldadura a solape quedan determinados por la longitud del cordón, y en la dirección transversal, por el espesor o garganta del cordón y la penetración del material de soldadura en el material base, tanto en longitud como en profundidad. En la figura 4.6 quedan recogidos los requerimientos para estos tres parámetros en función del espesor de las chapas. La tabla 5.1 recoge los valores teóricos y los valores reales medidos para dichos parámetros. Con respecto al espesor de cordón s , si no se puede determinar fácilmente puede recurrirse como criterio sustitutivo al menor espesor de cordón común, s_N , o espesor de cordón efectivo [12] (ver figura 4.4). El espesor de cordón común más pequeño s_N es el trayecto más corto entre la intersección del borde del componente con el

5.2. Análisis metalográfico

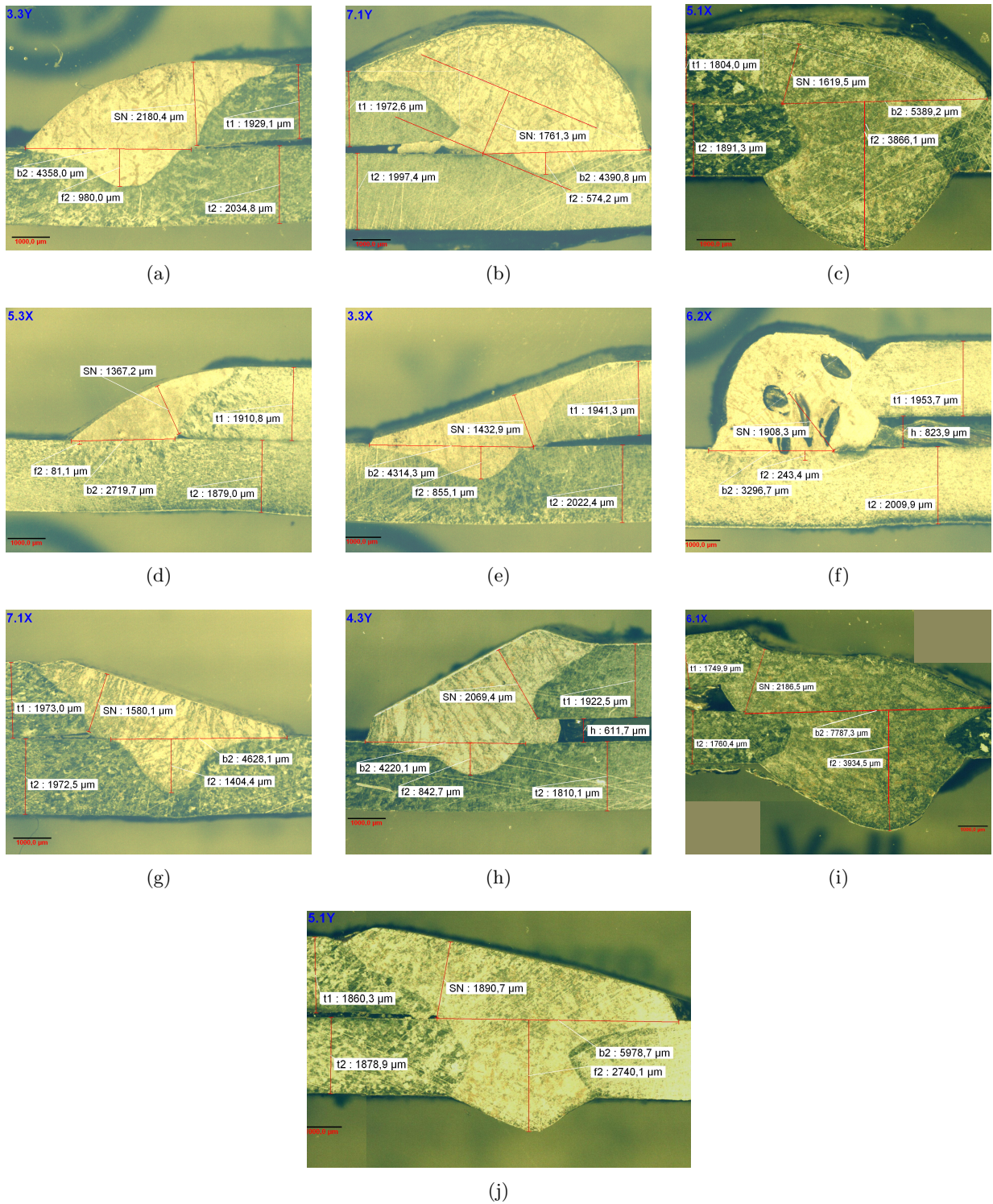


Fig. 5.13: Micrografías de los cordones de soldadura y valores de espesor de cordón, profundidad y longitud de penetración de (a) 3.3Y, (b) 7.1Y, (c) 5.1X, (d) 5.3X, (e) 3.3X y (f) 6.2X, (g) 7.1X, (h) 4.3Y, (i) 6.1X y (j) 5.1Y.

5. Resultados y Discusión

material de aporte y la superficie del cordón de soldadura. También se puede definir como la sección de soporte más estrecha a lo largo del flujo de fuerza en la unión soldada. Para determinar el menor espesor de cordón común s_N debe determinarse siempre la unión (común) más corta de ambas piezas unidas mediante soldadura, sin tener en cuenta el resalte del cordón en el caso de cordones de soldadura abombados (ver figura 4.4(b)).

Muestra	t_{min}	Valor mínimo teórico			Valor real		
		S_N	f_2	b_2	S_N	f_2	b_2
3.3Y	1.93	1.35	0.20	1.93	2.18	0.98	4.36
7.1Y	1.97	1.38	0.20	1.97	1.76	0.57	4.39
4.3Y	1.81	1.27	0.20	1.81	2.07	0.84	4.22
7.1X	1.97	1.38	0.20	1.97	1.58	1.40	4.63
6.1X	1.75	1.23	0.20	1.75	2.19	3.93	7.79
5.1X	1.80	1.26	0.20	1.80	1.62	3.87	5.39
5.1Y	1.86	1.30	0.20	1.86	1.89	2.74	5.98
5.3X	1.88	1.32	0.20	1.88	1.37	0.08	2.72
3.3X	1.94	1.36	0.20	1.94	1.43	0.86	4.31
6.2X	1.95	1.37	0.20	1.95	1.91	0.24	3.30

Tabla 5.1: Valores en mm de espesor de cordón, profundidad y longitud de penetración teóricos y reales de las secciones transversales de las muestras.

5.3 Comparación entre análisis ultrasónico y metalográfico. Validación del método propuesto

Como se indicó en la sección anterior, las muestras cortadas se emplean para investigar la medición del perfil del cordón obtenido mediante ultrasonidos. Los resultados experimentales para los distintos perfiles de los cordones de soldadura obtenidos por ultrasonidos y mediante secciones metalográficas de acuerdo a las tres posiciones de inspección propuestas se presentan en la tabla 5.2. Mencionar que en esta tabla sólo quedan recogidos los picos ultrasónicos y/o posiciones correspondientes a la línea de fusión de la soldadura y a la pared de fondo de la chapa inferior 2.

La máxima diferencia entre el valor real y el valor obtenido mediante ultrasonidos es de un 49.04% (0.49 mm) y se da para la muestra 3.3X. Esta muestra se corresponde con un cordón rectificad. La eliminación del material en estos casos se realizó de forma manual y la superficie resultante, en vez de plana, queda ligeramente biselada, tal y como se puede comprobar en la micrografía de su sección transversal 5.13(e). El resultado de ello es que la normal del palpador no está incluida en el plano que contiene a la sección transversal, sino que el haz ultrasónico penetra en el material de atrás hacia delante según la inclinación de la cabeza del cordón. Por ello el haz ultrasónico recorre dentro del material una mayor distancia. Consecuentemente, las

5.3. Comparación entre análisis ultrasónico y metalográfico. Validación del método propuesto

Muestra	Medición ultrasónica			Medición metalográfica			
	A	B	C	A	B	C	C
3.3Y	2.17	0.44	-	2.74	0.49	2.65	
	4.17	1.94	4.10	4.16	2.00	4.00	
7.1Y	4.30	-	3.59	3.73	1.39	3.55	
	5.53	2.57	-	5.48	2.74	7.10	
4.3Y	-	2.20	2.67	2.74	2.00	2.65	
	-	2.98	3.84	4.25	2.90	3.74	
7.1X	-	-	1.06	2.26	-	0.97	
	3.35	1.46	2.94	3.37	1.42	2.87	
6.1X	-	1.87	2.40	-	2.28	2.34	
	5.09	4.96	5.35	5.62	5.00	5.67	
5.1X	-	3.84	-	-	3.77	-	
	5.73	4.70	5.18	5.80	4.77	5.19	
5.1Y	-	1.76	1.11	-	1.94	0.96	
	3.88	3.54	2.98	4.00	3.92	2.92	
5.3X	1.48	1.04	0.74	1.45	0.93	0.87	
	4.10	1.65	3.42	3.48	1.77	3.39	
3.3X	1.04	-	1.32	1.55	-	1.35	
	2.94	1.48	2.76	3.45	1.53	2.87	
6.2X	1.15	2.01	1.32	1.27 ¹⁾	1.93 ¹⁾	1.23 ¹⁾	
	3.65	4.77	2.80	3.44 ²⁾	5.04	2.57 ¹⁾	

Tabla 5.2: Valor en mm de posición de los ecos de las señales ultrasónicas y valor de posición de la línea de fusión y de la pared de fondo de la chapa inferior 2 de acuerdo a la sección metalográfica desde las distintas posiciones de inspección y para cada una de las muestras. 1) Poro. 2) Línea de fusión.

posiciones obtenidas mediante ultrasonidos son mayores que las reales y el error entre métodos de inspección máximo.

Si se descarta esta muestra, el nuevo máximo de error entre mediciones es del 26.27%, correspondiente con la soldadura 3.3Y. En cambio, el mínimo se da para la muestra 5.1X con un valor del 0.19%. El valor medio de error entre mediciones es de un 6.18% y un 74% de las mismas queda por debajo del 10% de error. Por tanto, queda probada una buena correspondencia entre los valores estimados o predichos y los valores reales.

A continuación se interpretan los resultados de las ondas ultrasónicas reflejadas por la línea de fusión del cordón de soldadura y las propias superficies de las chapas que intervienen en la unión de acuerdo con los perfiles obtenidos en 5.2, esto es, soldadura óptima, soldadura con recrecido o pandeo de la raíz, soldadura con penetración insuficiente y porosidad interna.

Antes de iniciar la discusión, señalar que la primera parte de la señal ultrasónica se va descartar

5. Resultados y Discusión

del análisis por constituir una señal de ruido propia de la rugosidad del cordón y de la falta de acoplamiento en la totalidad del área del retardo debido a la falta de planitud de la cabeza del cordón, tal y como se vio en 4.4.1.

5.3.1 Soldadura óptima

Muestra 3.3Y

En la *posición A* (figura 5.3(a)), la señal ultrasónica referida muestra con claridad la existencia de dos picos y no sólo uno como se había descrito en 4.4.1. Se da el caso de que la dirección del haz con esa posición del palpador no incide directamente en la raíz, sino que el frente de ondas mira hacia la chapa inferior 2. Tal y como se puede ver en la micrografía de la sección transversal 5.13(a) esto es debido a la asimetría existente en el cordón. De hecho, esta circunstancia va a darse prácticamente en la totalidad de las muestras. Vemos pues la imposibilidad en este caso de obtener una medida intrínseca del espesor del cordón.

De los dos ecos, el primer se corresponde con la línea de fusión y, el segundo, con la pared inferior de la chapa 2. Estamos en realidad en una situación similar a *C*. Numéricamente, el eco de la línea de fusión aparece a 2.17 mm y el eco de fondo a 4.17 mm del cero del palpador. De acuerdo con 4.4.4, el eco del cordón aparece a una distancia superior a 1.40, lo que en parte tiene que ver con la disimetría existente, pues existe cierto rebose de material en ese punto con respecto a la hipotenusa del triángulo isósceles inscrito en el cordón, pero también con la profundidad de penetración lograda.

En la posición A del transductor, siempre que se haya logrado el espesor de garganta requerido, pueden darse dos casos extremos correspondientes a la soldadura teórica y a una soldadura con rebose de material, ya sea por abombamiento y/o asimetría del cordón. Bajo estos supuestos, el haz ultrasónico penetra en el material de manera que la perpendicular a la tangente en el punto de contacto forma un ángulo con la vertical de 45° (soldadura teórica) o bien coincide con la propia vertical, esto es, es perpendicular a las chapas (soldadura con rebose). En el primer caso, si el material fundido ha penetrado en la cara frontal de la chapa 2, la diferencia entre los ecos de fondo y de la línea de fusión, teniendo en cuenta además los requerimientos en cuanto a profundidad de penetración (0.2 mm), deberá ser inferior a 1.7 mm. Bajo el supuesto del segundo extremo, dicha diferencia entre posiciones de picos deberá ser menor que 2.4 mm para poder afirmar que la soldadura es buena. Lo normal es que el ángulo real de incidencia quede en un valor comprendido entre esos dos límites y, por tanto, la diferencia entre ecos característicos en un punto promedio entre 1.7 mm y 2.4 mm. En cualquier caso, si tomamos como primera referencia la situación más desfavorable, la diferencia entre ecos deberá ser siempre menor a 1.7 mm y en ningún caso, superior a 2.4 mm.

Así pues, en el caso que nos ocupa, la diferencia entre ecos es de 2 mm mientras que en la

5.3. Comparación entre análisis ultrasónico y metalográfico. Validación del método propuesto

realidad es de 1.42 mm, lo que nos indica por un lado que en realidad el ángulo de incidencia queda en un punto intermedio a los dos opuestos descritos y, por otro, que se ha alcanzado una buena penetración en la chapa 2. Si se compara con la sección metalográfica, efectivamente se ha logrado la profundidad de penetración mínima exigida.

La señal correspondiente con la *posición B* (figura 5.3(b)), del palpador muestra una sucesión de picos a la misma distancia cuya amplitud decae gradualmente conforme a una relación exponencial. Es el mismo comportamiento que se obtiene cuando el haz ultrasónico ve una única chapa. Efectivamente, en esta posición el ultrasonido se introduce en el material perpendicular a las chapas, con lo que se trata en realidad de la posición B_0 . No obstante, entre dos de estos picos consecutivos aparece una serie de múltiples ecos de baja amplitud, destacando uno a una distancia aproximada de 0.44 mm desde el cero del palpador. Este último hecho es el que difiere a la señal del comportamiento característico del haz cuando únicamente lee el espesor de una chapa y nos indica que los ultrasonidos están interfiriendo con la línea de fusión sobre el borde frontal de la chapa superior, con lo que existe afectación en esa cara.

De cualquier forma la situación acontecida es la descrita en 4.4.2 correspondiente a B_0 , pero desde un punto sobre el cordón ubicado realmente en B , es decir, que el palpador no está localizado en la intersección entre la cabeza del cordón y la chapa 1. Esto nos indica que existe derrame de material fundido o solapamiento con fusión sobre la chapa 1, tal y como se puede contrastar en la sección metalográfica.

Por último, el análisis del A-Scan en la *posición C* (figura 5.3(c)) arroja que sólo existe un único eco correspondiente con el eco de la pared de fondo de la chapa 2 a 4.17 mm. La primera consecuencia que se deriva de ello es que no se puede establecer ninguna diferencia entre ecos y, por tanto, determinar aunque sea de forma estimativa hasta qué punto ha penetrado la soldadura en la chapa 2. No de forma cuantitativa, pero indirectamente viene a indicar esta señal que por lo menos sí existe penetración en la cara frontal de la chapa 2, al no existir tampoco ningún otro eco significativo correspondiente con una falta de fusión en ese flanco.

El motivo de esta ausencia de eco de línea de fusión tiene que ver con la orientación de ésta con respecto al haz ultrasónico. Si observamos la imagen de la sección al microscopio 5.13(a), desde que el material de aporte empieza a introducirse en la chapa inferior hasta que alcanza su máximo de profundidad, la línea de fusión queda prácticamente paralela a la dirección del haz, que corresponde con la perpendicular a la tangente del cordón en el punto C , por lo que éste no la ve. En el punto de máxima profundidad, el transductor sí que es capaz de "iluminar" la frontera de la soldadura, pero la parte de la onda reflejada queda fuera del alcance del palpador, se pierde por uno de sus extremos, al ser el ángulo de incidencia y, por tanto, de reflexión, excesivamente abiertos con respecto a la vertical.

5. Resultados y Discusión

Muestra 7.1Y. Cordón convexo

En la muestra 7.1Y nos encontramos con un claro ejemplo de soldadura óptima con un elevado grado de convexidad. Una soldadura sobredimensionada es más costosa de producir en cuanto a velocidad de fabricación, no otorga una mayor fuerza o resistencia a la unión y supone un desperdicio de consumible de hilo de soldadura, además de provocar otros posibles problemas de fabricación, como puede ser una distorsión dimensional de las piezas excesiva o problemas de montaje posterior de componentes que se superponen o solapan con las piezas soldadas. Es más, una soldadura excesivamente convexa genera ángulos de transición excesivamente abruptos en los bordes de la soldadura que pueden convertirse en puntos concentradores de tensiones y, por tanto, de inicio de grietas. A pesar de ello, las soldaduras recogidas que exceden el tamaño o dimensionado teórico previsto se dan en la práctica con relativa frecuencia. De hecho, si un cordón de soldadura en forma de solapa no es clara ni profesamente cóncavo, lo habitual es que presente cierto abombamiento.

En la *posición A* (figura 5.4(a)) una vez más vuelven a aparecer dos picos referentes a la línea de fusión, a 4.30 mm, y a la superficie inferior de la chapa 2, a 5.53 mm. La diferencia entre ambos es de 1.23 mm (1.75 en realidad), con lo que se puede afirmar que se ha alcanzado una profundidad de penetración en la chapa 2 superior a 0.2 mm. Aparece también un tercer grupo de picos significativos a 1.78 mm, los cuales se corresponden con un pequeño núcleo de poros minúsculos tal y como se puede apreciar en la imagen 5.13(b).

Analizadas estas dos muestras, se llega a la conclusión de que en el caso de existir rebose de material, ya sea por abombamiento del cordón o por una asimetría del mismo, el exceso de material afecta a la medida de los dos ecos, esto es, tanto al pico de fondo como al pico de la línea de fusión. Se puede decir entonces que las posiciones de los dos ecos son magnitudes relativas (al rebose de material) en vez de absolutas. Así, la diferencia entre ambas magnitudes se presenta como una variable efectiva y fiable de la lectura de la profundidad de penetración.

Hacer especial mención también a la *posición C* (figura 5.4(c)), puesto que en este caso sólo se ve un único eco correspondiente a la línea de fusión a 3.59 mm. Dos son las razones por las cuales no aparece este pico. Primero, y debido al abombamiento del cordón, el haz ultrasónico se propaga dentro del material fundido a lo largo de una longitud considerable. Por la propia naturaleza del tamaño de grano en esta zona, el haz sufre gran dispersión en todas direcciones y puede que realmente no llegue a la pared de fondo de la chapa, más aún teniendo en cuenta que la distancia real a la que se encuentra ésta desde el cero del palpador es de 7.10 mm. Y en segundo lugar, en el supuesto de que sí lo hiciese, incidiría en la parte de la chapa 2 superpuesta a la chapa superior más allá de la región soldada. El reflejo de esa onda quedaría encerrado dentro de la propia chapa inferior, el cual el transductor, lógicamente, es incapaz de ver.

5.3. Comparación entre análisis ultrasónico y metalográfico. Validación del método propuesto

Muestra 4.3Y. Cordón rectificado

El análisis de las dos muestras siguientes se refiere a cordones rectificados a lo largo de su superficie para, por un lado, mejorar el acoplamiento del transductor al cordón y así aumentar el porcentaje de energía acústica transmitida dentro del material del mismo modo que se reducen las reverberaciones al inicio de la señal, y, por otro, eliminar el exceso o rebose de material propio de cordones convexos.

En la *posición A* (figura 5.5(a)), no se distingue ningún eco. Si no aparece ningún eco significativo en el A-Scan, es síntoma igualmente de una soldadura óptima. De acuerdo con lo explicado en 4.2, si no se muestra ningún pico a lo largo del tiempo de vuelo, quiere decir, de forma general, que el sonido se ha dispersado por completo dentro del material, o de un modo más concreto, que ha experimentado reflexión por parte de una serie de interfases que lo reflejan fuera del alcance del transductor. También podría darse el caso de la existencia de reflectores no perpendiculares al haz, es decir, paralelos a la dirección del ultrasonido, y, por lo tanto, indetectables, como por ejemplo la línea de fusión paralela al haz en 3.3Y posición *C*. Pero, si verdaderamente este fuera el caso, siempre se mostraría el eco de fondo, pues en las posiciones contempladas para el palpador, si no hay un obstáculo anterior, siempre el ultrasonido se va a ver reflejado por la pared inferior de la chapa 2. Así pues, cuando no se presentan ecos en la señal es por las múltiples reflexiones experimentadas en la línea de fusión, lo que nos indica cualitativamente que existe soldadura.

En *B* (figura 5.5(b)) se muestran claramente dos ecos que nada tienen que ver con el patrón de sucesión de picos propio de una sola chapa como han sido los casos en esta posición hasta ahora. Si el sonido no es capaz de reflejarse sucesivas veces dentro del material, es porque sufre gran dispersión a lo largo del mismo, lo que nos indica que se está propagando íntegramente dentro de la zona fundida. El primer eco se presenta a 2.20 mm y el segundo a 2.98 mm. Se trata de ecos muy cercanos, lo que significa que está viendo la región de la raíz de la soldadura en una configuración de chapas separadas: el primer eco se corresponde con la línea de fusión en la chapa 1 y el segundo, con la línea de fusión en la chapa 2.

El primer pico aparece rodeado de otra serie de ecos a modo de ruido o "hierba", de forma que en conjunto forman un eco de gran anchura. Se trata del fenómeno característico o identificativo cuando el sonido se topa con la línea de fusión de soldadura. En cambio, el segundo eco, se presenta sólo, sin ruido y a prácticamente el doble de amplitud que su predecesor. Se trata de un pico muy esbelto, estrecho y alto. Nos está indicando pues que realmente no corresponde con una línea de fusión, sino con un reflector claro a partir del cual el sonido únicamente se refleja, no se transmite más allá de él, como es una interfase acero-aire. Se trata pues del eco correspondiente de la propia raíz. Este hecho encaja perfectamente con la descripción del cordón otorgada por la imagen 5.13(h).

Por último, en *C* (figura 5.5(c)) vuelven a aparecer dos ecos a 2.67 mm y 3.84 mm,

5. Resultados y Discusión

correspondientes respectivamente a la línea de fusión y a la pared de fondo de la chapa inferior. La diferencia entre ambos es de 1.17 mm, con lo que se puede afirmar que se ha alcanzado una profundidad de penetración en la chapa 2 superior a 0.2 mm.

Muestra 7.1X. Cordón rectificado

Una vez más, en **A** (figura 5.6(a)) únicamente aparece el eco relativo a la pared de fondo de la chapa 2, como sucedía en la posición **C** de 3.3Y. Observando la imagen de la sección 5.13(g), se observa cómo la penetración del material fundido en la chapa inferior lo hace en forma de semicírculo (casquete esférico en realidad). Retomando el razonamiento de la muestra 4.3Y en la posición **A** y teniendo en cuenta la forma geométrica del cordón dentro de la chapa 2, las múltiples reflexiones del haz ultrasónico en las paredes de dicha semicircunferencia van a quedar retenidas siempre dentro de esa región hasta su atenuación completa dentro del material, sin llegar nunca a incidir de vuelta en el transductor.

En **B** (figura 5.6(b)) se presenta una sucesión de tres picos a una distancia de aproximadamente 1.46 mm que corresponde también con la posición del primer eco. De hecho, puedo intuirse incluso la aparición de un cuarto pico consecutivo al tercero a la misma distancia. Se trata pues de un perfil donde el sonido se refleja y rebota varias veces en la misma dirección. Por otro lado, no existe un eco que corresponda con la línea de fusión, con lo que el sonido viaja siempre dentro del mismo material. Por la ubicación del palpador en **B**, este medio se corresponde con el propio cordón. El hecho de que el haz no haya experimentado una elevada dispersión propia del material fundido y sea capaz de reflejarse varias veces dentro del cordón se debe a la mínima distancia a recorrer, 1.46 mm, y a que no interfiere en ningún momento con la línea de fusión, sino que incide directamente en la raíz de soldadura.

Los dos ecos en la **posición C** (figura 5.6(c)) correspondientes a la línea de fusión y a la pared de fondo de la chapa inferior, aparecen a 1.06 mm y 2.94 mm respectivamente. La diferencia entre ambos es de 1.90 mm, con lo que se puede afirmar que se ha logrado una profundidad de penetración en la chapa 2 superior a 0.2 mm, al menos en esa parte del cordón.

5.3.2 Soldadura con recrecido de raíz

Muestra 6.1X

En la **posición A** (figura 5.7(a)), la señal ultrasónica obtenida muestra con claridad la existencia de un único pico, el eco de fondo. Ésta va ser además la tónica en el análisis de las muestras con pandeo de raíz, por lo menos desde esta posición de inspección. Ello tiene su explicación, una vez más, en el perfil geométrico de este tipo de cordones. El eco de fondo en

5.3. Comparación entre análisis ultrasónico y metalográfico. Validación del método propuesto

realidad no se corresponde con la superficie opuesta a la de ensayo de la chapa 2, sino con el propio material fundido recrecido más allá de esta superficie. El sonido viaja siempre a través del mismo medio, el cordón, hasta que se topa con la frontera cordón-aire más allá de la pared de fondo de la chapa 2. Por ello, no tiene sentido hablar en este caso de eco procedente de línea de fusión, puesto que no existe la interfase material fundido-material base.

El eco de fondo para esta primera muestra de sobreespesor por la cara opuesta a la de inspección se muestra a 5.09 mm, que excede sobremanera el doble espesor correspondiente a las dos chapas superpuestas (3.80 mm). Existe también un eco significativo anterior a aproximadamente 1.36 mm. Los picos de ruido que acompañan a dicho eco hacen pensar en la existencia de algún poro, aunque no quede constatado en el corte transversal (ver figura 5.13(i)).

En la *posición B* (figura 5.7(b)), la normal del palpador coincide con la vertical. En este caso aparecen dos picos, el primero a 1.87 mm y el segundo a 4.96 mm. Este primer pico corresponde con la línea de fusión de la soldadura. A simple vista se puede constatar como el material de aporte se encuentra derramado con abombamiento negativo de recubrimiento en ese punto, hecho que está en consonancia con la micrografía de la sección transversal. Por ello, que el eco aparezca a 1.87 mm teniendo en cuenta que el espesor de la chapa 1 es de 1.90 mm, nos indica que se trata de la línea de fusión correspondiente a la chapa inferior 2 y, que por lo tanto, existe penetración en esa cara.

En *C* (figura 5.7(c)), el haz ultrasónico vuelve a ver a la línea de fusión de la soldadura en la chapa 2. El primer pico aparece rodeado una vez más de otra serie de ecos a modo de ruido desde la posición 1.32 mm. En conjunto forman un eco de gran anchura, con un pico máximo central a 2.40 mm, que corresponde con el espesor de la chapa 2 en diagonal. El segundo eco significativo se corresponde con la interfase cordón-aire a 5.35 mm. Queda pues constatado nuevamente el recrecido de la raíz.

Muestra 5.1X. Cordón convexo

La muestra 5.1X se corresponde con una soldadura con sobreespesor en dos direcciones: recrecido de raíz por un lado, y abombamiento o convexidad del cordón por el otro. Al igual que sucedía en 6.1X A, en la misma *posición A* (figura 5.8(a)) para esta muestra aparecen dos picos. El eco de fondo lo hace a 5.73 mm y su predecesor a 1.81 mm del cero del palpador. En la figura 5.13(c) pueden apreciarse dos grandes poros superficiales en las inmediaciones de la zona central de la cabeza del cordón. Este primer eco puede corresponderse con uno de ellos, aunque su profundidad dentro del cordón no puede determinarse al no aparecer dichos poros en el corte transversal.

Al estar el cordón abombado, la dirección de penetración del haz en la *posición B* (figura 5.8(b)) coincide con la vertical. En esta posición aparecen no dos, sino tres picos, a 2.27 mm, 3.84

5. Resultados y Discusión

mm y 4.70 mm. Comparándolos con la sección metalográfica, los dos primeros se corresponden con la línea de fusión en la chapa inferior y el último, con el límite del cordón más allá de la pared de fondo de la chapa 2. Que el primer eco, según la dirección de propagación y el punto de contacto tenga lugar a mayor distancia que el espesor de las chapas, está indicando que existe solapamiento con fusión del cordón sobre la chapa 1 y penetración en la chapa 2. Como además anterior a ese pico apenas existe "hierba", se trata de un área muy próxima a la raíz de la soldadura.

La descripción para la *posición C* (figura 5.8(c)) es completamente análoga a la muestra 6.1X, con la única diferencia de que no lee el eco de línea de fusión. El eco de fondo se presenta a 5.18 mm.

Muestra 5.1Y. Cordón rectificado

La muestra 5.1X corresponde con una última casuística de recrecido de raíz, pero con la superficie del cordón rectificada. La primera consecuencia de la eliminación del material sobrante en la cabeza del cordón es, para la *posición A* (figura 5.9(a)), la aparición de un eco posterior (6.97 mm) al eco de fondo exactamente a la misma distancia que el eco de fondo con respecto al cero del palpador (3.38 mm). Ello significa que el haz ha sido capaz de reflejarse una segunda vez dentro del cordón, a pesar de la dispersión que experimenta en él debido a su gran tamaño de grano. Este hecho se justifica en la menor trayectoria a recorrer por el haz desde su introducción en el material, pero también a que la superficie límite del recrecido está orientada de forma perpendicular al haz, con lo que no se pierde energía por los extremos del palpador.

En *B* (figura 5.9(b)), se presentan dos picos a 1.76 y 3.54 mm. El primer pico aparece rodeado del ruido característico de la línea de fusión mientras que el segundo lo hace en solitario con la esbeltez propia de la interfase en el que el medio al otro lado de la propagación del haz es aire. Así pues el primero de ellos se trata del eco de la línea de fusión y el segundo al eco de fondo correspondiente con la pared posterior de la chapa 2. No obstante, el primer pico es mucho más alto porque experimenta una especie de interferencia constructiva: se suma al eco que viaja hasta la pared de fondo y es reflejado por la línea de fusión, la parte de la onda que proviene de la pared de fondo de la chapa 1. Este hecho es indicativo de que el transductor está viendo una vez más la región de la raíz.

Por último, en la *posición C* (figura 5.9(c)) se vuelven a observar dos picos a 1.11 mm y a 2.98 mm, procedentes respectivamente de la línea de fusión y de la pared de fondo de la chapa 2. La diferencia entre ambos es de 1.87 mm, con lo que se puede afirmar que se ha alcanzado una profundidad de penetración en la chapa 2 superior a 0.2 mm, como en casos anteriores.

Aglutinando los resultados en las tres posiciones, se comprueba que únicamente en la posición *A* se es capaz de observar el recrecido de la raíz. Esta situación es indicativa de que el sobreespesor

5.3. Comparación entre análisis ultrasónico y metalográfico. Validación del método propuesto

de la raíz es mucho menor que en las otras dos muestras, tal y como se puede constatar en la micrografía 5.13(j).

Por último acerca del análisis de los cordones con recrecido de raíz, en caso de existir eco de línea de fusión en las posiciones *B* y *C*, la diferencia entre éste y el eco de fondo, es en todos los casos superior al espesor de la chapa 2 en diagonal, es decir, formando 45° con la vertical: 2.69 mm. Éste se trata del caso más crítico, con lo que queda finalmente ratificado el sobreespesor de la raíz en todas las muestras.

5.3.3 Soldadura con penetración insuficiente

Muestra 5.3X

En la *posición A* (figura 5.10(a)) una vez más vuelven a aparecer dos ecos referentes a la línea de fusión, a 1.48 mm, y a la superficie inferior de la chapa 2, a 4.10 mm. Que el primer pico se muestre a una distancia de tan sólo 1.48 mm desde la cabeza del cordón, refleja que su espesor está en un valor muy cercano a la garganta teórica (1.32 mm de acuerdo con 5.1). Esta circunstancia es síntoma de que no existe rebose de material de aporte. Por otro lado este primer eco se presenta también sin la señal de ruido circundante característica de la línea de fusión. La interfase es clara, no origina grandes reflexiones, con lo que realmente parte del haz está viendo la raíz de la soldadura.

La diferencia entre estos dos ecos es de 2.62 mm (2.03 en realidad), valor superior a 2.4 mm, con lo que manifiestamente se puede afirmar que no se ha alcanzado la profundidad mínima de penetración requerida en la chapa 2 (0.2 mm). Este hecho se pone de manifiesto en la fotografía de la sección transversal del cordón 5.13(d).

En la *posición C* (figura 5.10(c)) se observan nuevamente los dos ecos de línea de fusión y de pared de fondo de la chapa inferior a 0.74 mm y 3.42 mm respectivamente. Los dos marcan una diferencia de 2.68 mm (2.52 mm en realidad), con lo que tampoco en esta posición del sonido se logra la mínima profundidad de penetración requerida.

Por último, en la *posición B* (figura 5.10(b)), vuelve a aparecer una sucesión de tres ecos a la misma distancia entre ellos (1.85 mm) y cuya amplitud va reduciéndose de forma progresiva. Ello supone una vez más que una parte de la onda se está transmitiendo dentro de la chapa superior 1. No obstante, entre pico y pico se puede apreciar mucho ruido, con lo que también se está topando parte de la onda con la interfase que constituye la línea de fusión en esa chapa 1. En esta posición del palpador el haz ultrasónico se propaga dentro del material a lo largo de la vertical, con lo que estamos en realidad ante la situación B_0 . Teniendo en cuenta esta circunstancia junto al hecho de que se está viendo en todo momento la línea de fusión a lo largo de todo el espesor de la chapa

5. Resultados y Discusión

superior, estamos ante un caso de gran penetración en la cara frontal del chapa 1, lo que nos hace pensar también en un solapamiento con fusión sobre esa superficie.

Muestra 3.3X. Cordón rectificado

En este caso la rectificación del cordón se debe, además de a los motivos ya expuestos, a la voluntad de simular un cordón con abombamiento negativo. Hasta ahora habíamos analizado cordones con rebose de material, bien por abombamiento, bien por asimetría, pero no cordones con un marcado grado de concavidad. Este grado de concavidad queda patente en las reverberaciones del sonido existentes al inicio de la señal. Y es que la rectificación del cordón se hizo de forma que la superficie resultante estuviese ligeramente biselada en vez de plana para simular ese abombamiento negativo. En consecuencia los primeros ecos de la señal se corresponden con ese hueco generado en la superficie a tal propósito.

En la *posición A* (figura 5.11(a)) los dos ecos característicos se presentan a una distancia de 1.04 mm y 2.94 mm desde la introducción del ultrasonido en el cordón. La diferencia entre ellos es de 1.90 mm con lo que en este caso sí se ha logrado una profundidad mínima de 0.2 mm de penetración en la chapa 2 (contrastar con la sección transversal del cordón 5.13(e)).

De igual forma, en la *posición C* (figura 5.11(c)) los ecos correspondientes a la línea de fusión y a la pared inferior de la chapa 2 aparecen a 1.32 mm y 2.76 mm y constituyen una diferencia entre ellos de 1.44 mm (inferior a 1.70 mm), con lo que también se ha alcanzado una profundidad de penetración superior a los 0.2 mm mínimos exigidos. Con la constatación del cumplimiento de la norma para la profundidad de penetración en estas dos posiciones del palpador, se puede afirmar sin equivocación alguna, que el mínimo de penetración requerida se ha logrado a lo largo de toda la cara frontal de la chapa 2 y no sólo sobre un área o región concreta.

En la *posición B* (figura 5.11(b)) aparece un único pico a 1.48 mm de la cabeza del cordón. Se trata además de un eco de gran intensidad. Unido ello a la inexistencia de un eco significativo anterior y a la dirección de propagación del haz para esta posición del palpador, es indicativo de que se está apuntando a la raíz de la soldadura. Por tanto, esta posición del eco puede tomarse también como una medida estimativa del espesor del cordón.

5.3.4 Soldadura con poros internos

Muestra 6.2X

En la sección metalográfica de esta muestra 6.2X puede verse la elevada porosidad interna existente (ver figura 5.13(f)). Las reflexiones o ecos que hemos visto hasta ahora presentan dos comportamientos diferenciados en función de si proceden de elementos planos o volumétricos. El

5.3. Comparación entre análisis ultrasónico y metalográfico. Validación del método propuesto

eco concerniente a la pared de fondo de una de las dos chapas, al ser éstas superficies planas, se trata de un único pico con mayor o menor grado de amplitud en función de la energía que ha logrado transmitirse hasta ese punto. En cambio, la línea de fusión de la soldadura, al tratarse en realidad de una superficie cerrada en el espacio tridimensional, produce una sucesión de reflexiones cuya anchura de pico conjunta cambia gradual y continuamente.

En este sentido, un poro es un defecto volumétrico, por lo que cabe esperar una reflexión con comportamiento análogo al de la línea de fusión. Así pues, un núcleo de poros ocasiona múltiples picos, pero a diferencia de aquella, son reflexiones muy "inestables", con la anchura y la posición del eco variando rápida y constantemente, llegando incluso a desaparecer de repente. Este patrón "ruidoso" es el que puede apreciarse en las señales ultrasónicas [5.12](#).

Conclusiones

En el presente estudio se han examinado las condiciones de las ondas ultrasónicas reflejadas por el cordón de soldadura en forma de solapa en chapas finas de acero medio-suave y se ha presentado un método de interpretación de dichas reflexiones. Los resultados obtenidos demuestran que la inspección interior del cordón de soldadura se puede realizar en tres pasadas conforme a las posiciones *A*, *B* Y *C* del palpador. El transductor empleado junto con el retardo posee un diámetro de 5 mm y genera una onda longitudinal de 90°. Al posicionar el palpador de forma que la normal coincide con la perpendicular a la tangente en cada punto de inspección del cordón, se transmite una única onda también longitudinal dentro del material. Las reflexiones, ya sean de la línea de fusión o de la pared de fondo de la chapa inferior, proceden de un haz de ondas longitudinales. El haz longitudinal del transductor es capaz de "iluminar" en su diámetro (5 mm) una zona vertical de más de dos veces el espesor de las chapas (3.8 mm), incluso cuando se obstaculiza la propagación del haz. Esto implica que el haz ultrasónico, desde los tres puntos de incidencia, cubre la totalidad del área de la región soldada.

En segundo lugar, las reflexiones o ecos de las señales obtenidas, presentan dos comportamientos diferenciados en función de si proceden de elementos planos o volumétricos. El eco concerniente a la pared de fondo de una de las dos chapas al ser éstas superficies planas, se trata de un único pico con mayor o menor grado de intensidad en función de la energía que ha logrado transmitirse hasta ese punto. En cambio, la línea de fusión de la soldadura, al tratarse en realidad de una superficie cerrada en el espacio tridimensional, produce una sucesión de reflexiones cuya anchura de pico conjunta cambia gradual y continuamente. Estos múltiples ecos en forma de ruido o "hierba" son consecuencia también de una estructura de grano más grueso correspondiente con la zona de fusión y la zona afectada por el calor. Por lo tanto, se pueden distinguir claramente entre los ecos que proceden de la línea de fusión y los que provienen de la pared de fondo de las chapas, principalmente de la placa inferior, determinando así la geometría del cordón.

El análisis ultrasónico en las posiciones de inspección *A*, *B* Y *C* cuantitativamente no es válido para casos alejados de la soldadura teórica (triángulo isósceles) como los casos de asimetría o abombamiento del cordón, donde existe un rebose de material en la cabeza, o de derramamiento o

6. Conclusiones

abombamiento negativo excesivo del material en la misma. La razón de ello es el desconocimiento de la dirección concreta en la que viaja el frente de ondas ultrasónicas dentro del material.

De la misma forma, pero ya de una forma más general, determinar los valores de espesor de cordón, profundidad y longitud de penetración no se puede realizar de forma precisa. Se puede establecer si las dos caras frontales se han visto afectadas por la soldadura, si no han experimentado unión y por lo tanto existe una falta de fusión en los flancos, si el material depositado en la cabeza es suficiente para lograrse el mínimo espesor requerido, pero no en qué medida. Por tanto, el método propuesto es potente a nivel cualitativo, pero no cuantitativo porque se desconoce concretamente en qué dirección exacta se propaga el haz ultrasónico dentro del cordón.

Por otro lado, este método, en consonancia con las generalidades en la utilización de un transductor de haz recto o normal, está limitado a ver reflectores con dimensión principal perpendicular a la dirección de propagación del haz. Los cambios de material que se produzcan en la misma dirección que la de propagación del sonido no serán detectados. Otra conclusión del estudio radica en que la señal ultrasónica es más precisa en cordones rectificadas que en su estado primario tras la soldadura. Un cordón pulido origina una nueva cabeza con superficie plana y menor rugosidad, con lo que reduce el ruido al inicio de la señal, optimiza el acoplamiento del transductor a la pieza y, por tanto, mejora la transmisión del sonido dentro del cordón, elimina el exceso de material en la cabeza y, por ello, permite que el haz dentro del mismo elemento recorra una mayor distancia hasta experimentar el mismo nivel de dispersión. Por todo ello, las medidas de posición (tiempo de vuelo) de los ecos ultrasónicos se ajustan con mayor precisión al valor real, reduciéndose así el error en la medición.

A lo largo del estudio, por último, se ha descubierto el potencial de una nueva variable para la determinación del grado de profundidad de penetración f_2 . Esta magnitud relativa se define como la diferencia entre las posiciones de los ecos procedentes de la línea de fusión y de la pared opuesta a la de inspección de la chapa inferior 2. Así:

- Si la diferencia es menor que 1.7 mm, se ha logrado una profundidad de penetración en la chapa inferior superior a 0.2 mm.
- Si la diferencia queda comprendida entre 1.7 mm y 2.4 mm, se ha logrado una profundidad de penetración en la chapa 2 de al menos 0.2 mm.
- Si la diferencia queda comprendida entre 2.4 mm y 2.69 mm, a pesar de que existe fusión en la cara frontal de la chapa 2, no se ha alcanzado la profundidad de penetración mínima requerida.
- Si la diferencia es mucho mayor que 2.69 mm, estaremos ante un recrecido o sobreepesor de la raíz.

La valoración de esta nueva magnitud permite distinguir entre varios perfiles de soldadura, puesto que el primer y último caso se corresponden con una soldadura óptima, el segundo con un ejemplo de pandeo de la raíz y el tercero, con un patrón de soldadura con penetración escasa o insuficiente.

Una soldadura con porosidad interna también presenta una señal ultrasónica característica. Al ser un poro un defecto volumétrico, origina una reflexión con múltiples picos (ruido) análoga a la reflexión desde la línea de fusión, pero a diferencia de ésta, se trata de ecos muy inestables, con la anchura y la posición del eco variando rápida y constantemente, llegando incluso a desaparecer de repente.

El empleo de estas señales características de cada perfil geométrico del cordón como un estándar de referencia, junto con un conocimiento de la propagación de la onda de sonido, permitirán identificar patrones de eco específicos correspondientes a la respuesta de eco de soldaduras buenas y de reflectores representativos. El patrón de eco a partir de una soldadura cualquiera puede entonces ser comparado con los patrones de estos estándares para determinar su geometría y su estado.

Bibliografía

- [1] S. Ozcelik, K. Moore, and D. Naidu, *Modeling, Sensing and Control of Gas Metal Arc Welding*. Elsevier Science Ltd, first ed., 2003.
- [2] “ISO 857-1:1998. Welding and allied processes. Vocabulary. Part 1: Metal welding processes.”
- [3] Exsa-Oerlikon, *Manual de soldadura. Conceptos generales de soldadura y procesos*.
- [4] K. Weman, “Welding processes handbook.” Woodhead Publishing Ltd, 2003.
- [5] I. Aguirre, “El proceso de soldadura MIG/MAG.” Fronius.
- [6] H. Saunders, “Gas metal arc welding guide. MIG/MAG welding guide.” Lincoln Electric, November 1997.
- [7] S. Tabatabaeipour and F. Honarvar, “A comparative evaluation of ultrasonic testing of AISI 316l welds made by shielded metal arc welding and gas tungsten arc welding processes,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, no. 8, pp. 1043 – 1050, 2010.
- [8] P.Sathiya, S.Aravindan, P. Ajith, B.Arivazhagan, and A. N. Haq, “Microstructural characteristics on bead on plate welding of AISI 904 L super austenitic stainless steel using gas metal arc welding process,” *International Journal of Engineering, Science and Technology*, vol. 2, no. 6, pp. 189 – 199, 2010.
- [9] E. Karadeniz, U. Ozsarac, and C. Yildiz, “The effect of process parameters on penetration in gas metal arc welding processes,” *Materials and Design*, vol. 28, pp. 649 – 656, 2007.
- [10] V. Varia and Y. Ganatra, “Ultrasonic testing of welded joints prepared at different voltage and current,” *International Journal of Research in Engineering and Technology (IJRET)*, vol. 2, pp. 738 – 742, November 2013.
- [11] “UNE-EN ISO 5817:2009. Soldeo. Uniones soldadas por fusión de acero, níquel, titanio y sus aleaciones (excluido el soldeo por haz de electrones). Niveles de calidad para las imperfecciones.”

BIBLIOGRAFÍA

- [12] “VW 01106-1:2009-08. Soldadura en atmósfera protectora. Uniones de chapas de acero. Diseño, ejecución y aseguramiento de la calidad.”
- [13] “PV 6728:2009-08. Soldadura en atmósfera protectora. Uniones de chapas de acero. Valoración de las uniones soldadas.”
- [14] M. L. Izcara, “Development of methods for the determination of phase mixture at different steel grades by ultrasonic and eddy current techniques,” *Salzgitter Mannesmann Forschung*, vol. None, pp. 1 – 49, December 2010.
- [15] T.-Y. Wu and I. C. Ume, “Prediction and experimental validation of penetration depth of butt welds in thin plates using superimposed laser sources,” *NDT & E International*, vol. 50, no. 0, pp. 10 – 19, 2012.
- [16] R. Ditchburn, S. Burke, and C. Scala, “NDT of welds: state of the art,” *NDT & E International*, vol. 29, no. 2, pp. 111 – 117, 1996.
- [17] Y. Lu, *Real time defect detection in welds by ultrasonic means*. PhD thesis, Department of Materials Technology, Brunel University, 1992.
- [18] B. Lopez, “Weld inspection with EMAT using guided waves,” *The e-Journal of Nondestructive Testing*, vol. None, p. None, Mayo 2008.
- [19] B. Messer, C. Patrick, and S. Seitz, “Achieving cost savings with innovative welding and examination techniques,” *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 83, no. 5, pp. 365 – 372, 2006.
- [20] J. D. N. Cheeke, *Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves*. CRC Press LLC, 2002.
- [21] W. K. Yung, W. Lee, B. Ralph, and R. Fenn, “The control of the thin-plate welds geometry and microstructure,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 63, pp. 802 – 805, 1997.
- [22] T. H. University, “Introduction to non-destructive testing techniques. Ultrasonic testing.”
- [23] C. J. Hellier, *Handbook of Nondestructive Evaluation*. McGraw-Hill, 2003.
- [24] M. Berke, *Basic Principles of Ultrasonic Testing*. Krautkrämer NDT Ultrasonic Systems, Agfa NDT GmbH, 2002.
- [25] M. Berke, “Nondestructive material testing with ultrasonics. Introduction to the basic principles.” Krautkrämer GmbH.
- [26] J. . D. . Lavender, “Ultrasonic testing of steel castings.” Steel Founders’ Society of America, 1976.

-
- [27] B. M. Lempriere, *Ultrasound and elastic waves. Frequently asked questions*. Academic Press, May 2002.
- [28] *Nondestructive Testing Handbook. Ultrasonic Testing*, vol. 7. The American Society for Nondestructive Testing (ASNT), third ed., 2007.
- [29] R. A. Youshaw and E. L. Criscuolo, *A guide for the nondestructive testing of non-butt welds in commercial ships. Part two*. Ship Structure Committee, January 1976.
- [30] G. M. Graham and I. Ume, “Automated system for laser ultrasonic sensing of weld penetration,” *Mechatronics*, vol. 7, no. 8, pp. 711 – 721, 1997.
- [31] D. Hardt and J. Katz, “Ultrasonic measurement of weld penetration,” *Welding Research Supplement*, vol. None, pp. 273 – 281, September 1984.
- [32] A. Kita and I. C. Ume, “Measuring on-line and off-line noncontact ultrasound time of flight weld penetration depth,” *Welding Journal*, vol. None, pp. 9s – 17s, 2007. G.W. Woodruff School of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Ga.
- [33] M. D. Rogge, *In process- sensing of weld penetration depth using non-contact laser ultrasound system*. PhD thesis, School of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology, November 2009.
- [34] S. W. Kerchel, R. A. Kisner, M. B. Klein, G. D. Bacher, and B. Pouet, “In-process detection of weld defects using laser-based ultrasound,” in *Proc. SPIE*, vol. 3852, pp. 81 – 92, 1999.
- [35] T. Ebuchi, J. Kitasaka, and T. Nagai, “Non-destructive evaluation of weld structure using ultrasonic imaging technique,” *Materials Transactions*, vol. 53, no. 4, pp. 604 – 609, 2012.
- [36] S. A. Titov, R. G. Maev, and A. N. Bogachenkov, “Pulse-echo NDT of adhesively bonded joints in automotive assemblies,” *Ultrasonics*, vol. 48, no. 6 - 7, pp. 537 – 546, 2008.
- [37] W. Roye, *Ultrasonic Testing of Spot Welds in the Automotive Industry*. Krautkrämer GmbH.
- [38] “UNE-EN ISO 17640:2011. Ensayo no destructivo de uniones soldadas. Ensayo por ultrasonidos. Técnicas, niveles de ensayo y evaluación.”
- [39] C. Carpentier and J. Rudlin, “Manual ultrasonic inspection of thin metal welds,” *TWI (The welding Institute)*, vol. None, pp. 1 – 16, 2012.
- [40] “UNE-EN ISO 23279:2010. Ensayo no destructivo de uniones soldadas. Ensayo por ultrasonidos. Caracterización de las indicaciones en las soldaduras.”
- [41] P. Buschke, W. Roye, and T. Dahmen, “Multiple NDT methods in the automotive industry,” *GE Inspection Technologies*, vol. None, pp. 1 – 10, 2002.

BIBLIOGRAFÍA

- [42] P. Buschke and W. Schappacher, “Trends in the automotive industry. Steer new NDT applications.” GE Inspection Technologies.
- [43] L. Goglio and M. Rossetto, “Ultrasonic testing of adhesive bonds of thin metal sheets,” *NDT & E International*, vol. 32, no. 6, pp. 323 – 331, 1999.
- [44] M. Cozens, “Fillet welded joints - a review of the practicalities,” tech. rep., TWI (The welding Institute), Weld-Class Solutions, None.
- [45] “UNE-EN 1330-4:2010. Ensayos no destructivos. Terminología. Parte 4: Términos utilizados en ensayos por ultrasonidos.”
- [46] “UNE-EN ISO 17659:2005. Soldeo. Relación multilingüe de términos con ilustraciones para uniones soldadas.”

Grupos de valoración y valores límite de irregularidades en uniones soldadas GMAW

Esta guía de ensayo es válida para uniones soldadas por arco voltaico sobre chapas de acero con y sin recubrimiento, en un rango de espesor de chapa de 0.5 mm a 6 mm en fabricación de carrocerías, que estén principalmente sometidas a solicitaciones estáticas. Se aplica en ensayos de supervisión de series, aceptación y muestras.

Esta pauta ha sido elaborada a partir de:

- UNE-EN ISO 5817: 2009. Uniones soldadas por fusión en acero, níquel, titanio y sus aleaciones (sin soldadura por radiación). Grupos de valoración de irregularidades [11].
- VW 01106-1: 2009-08. Soldadura en atmósfera protectora, uniones de chapas de acero. Diseño, ejecución y aseguramiento de calidad [12], y
- PV 6728: 2009-08. Soldadura en atmósfera protectora, uniones de chapas de acero. Valoración de las uniones soldadas [13].

A diferencia, o como complemento a UNE-EN ISO 5817: 2009 son aplicables para los cordones de junta a tope, cordones angulares y cordones de solapa las especificaciones de la figura A.1, con independencia del espesor de pared.

Los siguientes valores límite para irregularidades son aplicables para cordones de solapa, de conformidad con UNE-EN ISO 5817: 2009 tabla 1:

Grieta, grieta en cráter final, poro superficial, rechupe abierto de cráter final, defecto de unión, microerror de unión, quemadura pasante, porosidad de raíz, salpicadura de soldadura,

A. Grupos de valoración y valores límite de irregularidades en uniones soldadas GMAW

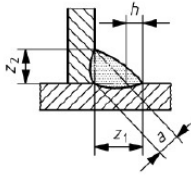
Nº	Número de orden	Irregularidad	Observaciones	Grupo de valoración D	Grupo de valoración C	Grupo de valoración B
Cordones de junta a tope, cordones angulares y cordones de solapa						
1.9	502	Recrecido del cordón demasiado grande		Ninguna valoración		
1.10	503					
1.19	517					
1.22	601					
4		Irregularidades múltiples				
Cordones angulares						
1.21	5214	Espesor de cordón angular demasiado grande		Ninguna valoración		
1.16	512	Asimetría del cordón angular (desigualdad de lados)		Se admite que no se alcance por un 20% la profundidad de penetración exigida por una cara	Admisible, si el espesor de cordón y la profundidad de penetración son correctas	Admisible, si el espesor de cordón y la profundidad de penetración son correctas

Fig. A.1: Discrepancias y complementos a UNE-EN ISO 5817: 2009.

microgrieta, poro, porosidad, nido de poros, línea de poros, poro tubular, rechupe, rechupe en cráter final, inclusiones (nº de orden 300 a 3042).

Para las restantes características deben tomarse los valores límite de las figuras A.3 y A.4.

Para determinar el grupo de valoración exigido para determinados esfuerzos, la figura A.2 proporciona una cierta orientación.

Grupo de valoración	Esfuerzo
B	unión realizada para tener resistencia operativa, sometida principalmente a esfuerzos dinámicos
C	unión sometida a reducidos esfuerzos dinámicos o principalmente estáticos
D	unión sometida a esfuerzos reducidos

Fig. A.2: Grupos de valoración.

A. Grupos de valoración y valores límite de irregularidades en uniones soldadas GMAW

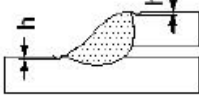
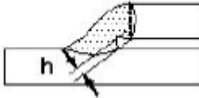
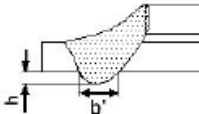
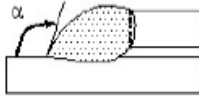
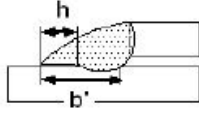
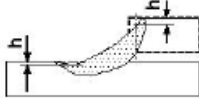
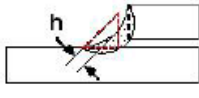
Nº	Número de orden	Irregularidad	Observaciones	Grupo de valoración D	Grupo de valoración C	Grupo de valoración B
1.7	5011 5012	Entalladura de penetración	Se exige una transición suave. 	$h \leq 0,2 \times t$ para $t < 3$ mm: sobre el 25%, como máximo, de la longitud del cordón	$h \leq 0,1 \times t$ para $t < 3$ mm: sobre el 25%, como máximo, de la longitud del cordón	no admisible, para $t > 3$ mm: $h \leq 0,05 \times t$
1.8	5013	Entalladura de raíz	Se exige una transición suave. 	$h \leq 0,2 \text{ mm} + 0,1 \times t$ para $t > 3$ mm: $h \leq 0,2 \times t$ sobre el 25%, como máximo, de la longitud del cordón	$h \leq 0,1 \times t$ para $t < 3$ mm: sobre el 25%, como máximo, de la longitud del cordón	no admisible, para $t > 3$ mm: $h \leq 0,05 \times t$
1.11	504	Recrecido de raíz Pandeo de raíz	Se exige una transición suave. 	$h \leq 1 \text{ mm} + 0,6 \times b'$ para $t > 3$ mm: $h \leq 1 \text{ mm} + 1,0 \times b'$ máximo 5 mm	$h \leq 1 \text{ mm} + 0,3 \times b'$ para $t > 3$ mm: $h \leq 1 \text{ mm} + 0,6 \times b'$ máximo 4 mm	$h \leq 1 \text{ mm} + 0,1 \times b'$ para $t > 3$ mm: $h \leq 1 \text{ mm} + 0,2 \times b'$ máximo 3 mm
1.12	505	Transición de cordón brusca Ángulo de transición de cordón		$\alpha \geq 90^\circ$	$\alpha \geq 100^\circ$	$\alpha \geq 110^\circ$
1.13	506	Rebose del material de aporte		$h \leq 0,2 \times b'$	Inadmisible	Inadmisible
1.14	509 511	Material de aporte derramado Abombamiento negativo de recubrimiento Estrangulamiento del espesor de pared en el borde del cordón	Se exige una transición suave 	$h \leq 0,25 \times t$ sobre el 25%, como máximo, de la longitud del cordón	$h \leq 0,1 \times t$ sobre el 25%, como máximo, de la longitud del cordón	no admisible para $t > 3$ mm: $h \leq 0,05 \times t$
1.17	515	Retrceso de la raíz	Véase entalladura de raíz	Valoración análoga a entalladura de raíz		
1.20	5213	Espesor de cordón demasiado pequeño Espesor de cordón no alcanzado		sobre máximo 25% de la longitud del cordón: $h \leq 0,2 \text{ mm} + 0,07 \times t$ para $t > 3$ mm: $h \leq 0,3 \text{ mm} + 0,07 \times t$	sobre máximo 25% de la longitud del cordón: $h \leq 0,2 \text{ mm}$ para $t > 3$ mm: $h \leq 0,3 \text{ mm} + 0,07 \times t$	Inadmisible

Fig. A.3: Grupos de valoración para cordones de solapa válidos para espesores de pared de 0.5 mm a 6 mm. Parte 1

A. Grupos de valoración y valores límite de irregularidades en uniones soldadas GMAW

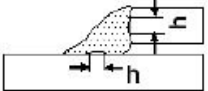
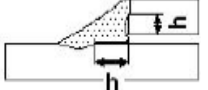

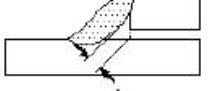
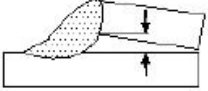
Nº	Número de orden	Irregularidad	Observaciones	Grupo de valoración D	Grupo de valoración C	Grupo de valoración B
2.12	4011	Fallo de unión de flancos		sobre el 25%, como máximo, de la longitud del cordón: $h \leq 0,3 \times t$	Inadmisibile	Inadmisibile
	4013	Fallo de unión de raíz				
	4012	Fallo de unión de capas (en el caso de soldadura de varias capas o rectificado posterior)				
2.13	402	Penetración de soldadura insuficiente		sobre el 25%, como máximo, de la longitud del cordón: $h \leq 0,15 \times t$	Inadmisibile	Inadmisibile
3.2	617	Medida de separación	Indica la medida de la separación en el punto raíz 	$h \leq 0,5 \text{ mm} + 0,07 \times t$ para $t > 3 \text{ mm}$: $h \leq 1 \text{ mm} + 0,2 \times t$	$h \leq 0,3 \text{ mm} + 0,07 \times t$ para $t > 3 \text{ mm}$: $h \leq 0,5 \text{ mm} + 0,15 \times t$	$h \leq 0,2 \text{ mm} + 0,07 \times t$ para $t > 3 \text{ mm}$: $h \leq 0,5 \text{ mm} + 0,07 \times t$
		En las uniones con adhesivo en las proximidades del cordón de soldadura se determina la medida de separación de la junta pegada.				

Fig. A.4: Grupos de valoración para cordones de solapa válidos para espesores de pared de 0.5 mm a 6 mm. Parte 2

