



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

Grado en Ingeniería Mecánica

**Elaboración del Procedimiento Escrito de  
Ejecución y Control de Calidad de una Unión  
Soldada de Virolas de Acero**

**Autor:**

**Alonso Laguna, Darío**

**Tutor:**

**Manuel López Aparicio  
Departamento de CMelM,  
EGI, ICGyF, IM e IPF**

**Valladolid, julio de 2017.**









# Índice

<b>ÍNDICE</b> .....	<b>1</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>3</b>
<b>KEYWORD</b> .....	<b>3</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>5</b>
OBJETIVOS .....	5
<b>CAPÍTULO I. UNIÓN SOLDADA. CONCEPTOS</b> .....	<b>7</b>
<b>CAPÍTULO II. PROCESOS DE SOLDADURA</b> .....	<b>11</b>
2.1.- PROCESOS DE SOLDADURA GENERALES .....	11
2.2.- SOLDADURA POR ARCO BAJO GAS PROTECTOR TIG .....	15
2.3.- SOLDADURA POR ARCO BAJO GAS PROTECTOR CON ELECTRODO CONSUMIBLE MAG .....	21
<b>CAPÍTULO III. DEFECTOLOGÍA EN UNIONES SOLDADAS</b> .....	<b>27</b>
3.1.- FISURAS Y GRIETAS .....	27
3.2.- CAVIDADES Y POROSIDAD .....	28
3.3.- INCLUSIONES SÓLIDAS.....	30
3.4.- FALTA DE FUSIÓN.....	30
3.5.- FALTA DE PENETRACIÓN .....	31
3.6.- DEFECTOS DE FORMA .....	32
<b>CAPÍTULO IV. CONTROL DE CALIDAD</b> .....	<b>35</b>
4.1.- ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y TECNOLÓGICOS APLICADOS EN LAS UNIONES SOLDADAS .....	35
4.2.- ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS APLICADOS EN LAS UNIONES SOLDADAS .....	39
4.3.- METALOGRAFÍA .....	50
<b>CAPÍTULO V. DISEÑO DE LA UNIÓN SOLDADA</b> .....	<b>57</b>
5.1.- DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO .....	57
5.2.- ELECCIÓN DEL PROCESO .....	59
5.3.- LA JUNTA DE LA UNIÓN SOLDADA .....	60
5.4.- VARIABLES OPERATIVAS .....	61
5.5.- NIVEL DE CALIDAD Y CONTROL DE CALIDAD DE LA UNIÓN SOLDADA .....	63
<b>CAPÍTULO VI. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA</b> .....	<b>65</b>
6.1.- ANÁLISIS QUÍMICO DEL MATERIAL .....	65
6.2.- ENSAYOS TECNOLÓGICOS.....	65
6.3.- ANÁLISIS METALOGRAFICO .....	66
<b>CAPÍTULO VII. VALIDACIÓN</b> .....	<b>67</b>
7.1.- CUPONES DE SOLDADURA .....	68
7.2.- ENSAYOS DESTRUCTIVOS .....	77
7.3.- METALOGRAFÍA .....	85
7.4.- ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS .....	85
7.5.- PREVENCIÓN DE RIESGOS LABORALES.....	92
<b>CAPÍTULO VIII. PROCEDIMIENTO ESCRITO DE SOLDADURA</b> .....	<b>93</b>



# Elaboración del Procedimiento Escrito de Ejecución y Control de Calidad de una Unión Soldada de Virolas de Acero



8.1.- ESPECIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO WPS .....	93
8.2.- HOMOLOGACIÓN DE SOLDADOR WPQ.....	96
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>99</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>101</b>
LIBROS.....	101
PUBLICACIONES .....	101
PÁGINAS WEB .....	101
NORMATIVA .....	101
<b>ANEXO I. CODIGO ASME .....</b>	<b>1</b>
<b>ANEXO II. PREVENCIÓN DE RIESGOS LABORALES .....</b>	<b>2</b>
II.1.- EQUIPOS DE PROTECCIÓN INDIVIDUAL.....	2
II.2.- EQUIPOS DE PROTECCIÓN DE LA ZONA DE TRABAJO .....	5



## RESUMEN

La soldadura es una de las tecnologías de conformado más utilizadas a nivel mundial, sobretodo en la construcción de bienes de equipo. En las últimas décadas los grandes avances en soldadura han venido de la mano de las mejoras electrónicas en sus equipamientos. Los nuevos tiempos exigen calidades superiores con costes razonables y esta técnica permite obtener un buen compromiso entre ambos. Por ello, para conseguir la calidad deseada a un coste admisible es importante la realización de un buen diseño previo.

Este trabajo se centra en el diseño de una unión soldada específica. En concreto se trata de una chapa de acero de 10 mm de espesor utilizada para formar virolas que se emplearán en la fabricación de un depósito acunado. Esto implica el diseño, análisis y realización de ensayos que derivarán en la creación del procedimiento escrito de soldadura y el registro de cualificación del procedimiento de soldeo.

## KEYWORD

Soldadura

Acero

Procedimiento

Calidad

Diseño



## ABSTRACT

Nowadays welding is one of the most important shaping technology on the industry. It stands out on the manufacturing of industry equipment. During the last years the development of the electronical equipment have allowed a huge progress on welding machine. Today the quality required is higher than years ago. In addition, the cost of the design and production have earned a lot of importance. Welding is able to make high-quality products without huge costs. For this reasons, is very important make a good design able to satisfy the specifications.

This text is focus on the design of a particular welded joint of a steel sheet of 10 mm thickness. It will be use on the production of tanks. The project includes the design, analysis and different kinds of tests as non-destructive test or technological test. This will result in a final welding procedure specification (WPS) and the procedure qualification report (PQR).

## KEYWORDS

Welding

Steel

Procedure

Quality

Design



# INTRODUCCIÓN

Se define la soldadura como la tecnología, fundamentada científicamente, que tiene como finalidad la unión íntima, de dos o más piezas metálicas de igual o distintos materiales, con o sin fusión, con o sin aportación de material metálico, en la que se consigue una continuidad adecuada entre ellas, desde el punto de vista físico, de propiedades físicas, químicas y fisicoquímicas, que fundamentan las características mecánicas y el comportamiento en servicio y ello sin producir zonas duras, armonizando adecuadamente con el conjunto metálico en el que se encuentran insertas. Todo ello al menor coste posible y con el nivel de calidad especificado para el grado de responsabilidad asignado durante el proceso de vida en servicio.

La soldadura es una tecnología de conformado que comenzó a utilizarse a principios del siglo XX. En la actualidad, es considerado uno de los procesos de conformados más importantes y utilizados en la industria, sobretodo en la fabricación de bienes de equipo. Su desarrollo ha permitido a su vez el de muchas industrias mejorando el nivel de calidad de las construcciones, reduciendo costes y aumentando la productividad. Ese desarrollo se ha conseguido gracias a los avances en máquinas eléctricas debido al gran desarrollo de la tecnología electrónica aplicada en los equipos de soldadura ya que el fundamento científico del proceso sigue siendo el mismo.

Aunque el fundamento de las soldaduras sea el mismo un pequeño cambio en sus variables operativas puede modificar en gran medida el resultado de la unión. Por eso es necesaria la creación de los procedimientos escritos para cada soldadura. Estos procedimientos son metodologías concretas sobre la realización de una unión soldada específica según un proceso determinado. Estos también definirán el nivel de calidad de la unión.

Por ser la soldadura un proceso de conformado de gran importancia en la industria, y los procedimientos escritos un pilar fundamental en su ejecución, se ha decidido que la temática de este trabajo de fin de grado sea la creación de un procedimiento escrito de soldadura y su control de calidad.

## OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es la realización de un procedimiento escrito de soldadura y del registro de calificación del procedimiento, referido a una unión soldada concreta.

Como objetivos derivados de este primero aparecen:

- El conocimiento de las diferentes técnicas de soldadura y sus aplicaciones. Además, aprender a seleccionar el proceso más adecuado en función de cada pieza, material y equipos disponibles.



## Elaboración del Procedimiento Escrito de Ejecución y Control de Calidad de una Unión Soldada de Virolas de Acero



- El aprendizaje y desarrollo de un proceso de maquetado.
- La familiarización con la maquinaria de soldadura y con los instrumentos del laboratorio necesarios para la realización de los ensayos.
- El aprendizaje en el uso de diferentes normativas y del Código ASME Sección X y su aplicación en la industria.



# CAPÍTULO I. UNIÓN SOLDADA. CONCEPTOS.

**Soldadura:** es la tecnología, fundamentada científicamente, que tienen como finalidad la unión íntima, de dos o más piezas metálicas de igual o distintos materiales, con o sin fusión, con o sin aportación de material metálico, en la que se consigue una continuidad adecuada entre ellas, desde el punto de vista físico y de propiedades físicas, químicas y fisicoquímicas, que fundamentan las características mecánicas y el comportamiento en servicio y ello sin producir zonas duras, armonizando adecuadamente con el conjunto metálico en el que se encuentran insertas. Todo ello al menor coste posible y con el nivel de calidad especificado para el grado de responsabilidad asignado durante el periodo de vida en servicio.

**Metal base:** es el metal del cordón de soldadura no afectado por la operación de soldadura, cuya composición química y microestructura corresponden completamente a las originales de partida.

**Zona Afectada Térmicamente (ZAT):** es la zona adyacente al cordón de soldadura que no se ha fundido pero que ha sufrido transformaciones microestructurales debido a su exposición a un ciclo térmico. Esas modificaciones pueden ser a nivel granular o de microconstituyentes.

**Zona de Metal Fundido (ZMF):** es la zona de la unión soldada, también conocida como cordón de soldadura, proveniente del caldo metálico, que se ha generado como consecuencia de la fusión del metal base y del material de aporte, si lo hubiera.

**Soldadura autógena:** unión soldada que no requiere material de aporte.

**Materiales similares:** se dice de los materiales metálicos con respuesta similar a un ciclo térmico y por tanto con propiedades similares como la temperatura de fusión, coeficiente de dilatación térmica, conductividad térmica y eléctrica, propiedades químicas, curva de variación del límite elástico con la temperatura, etc.

**Soldadura similar:** unión soldada de dos o más materiales metálicos similares. Esta a su vez se divide en dos tipos si hubiera material de aporte:

- **Homogénea:** soldadura cuyo material de aporte también es similar.
- **Heterogénea:** soldadura cuyo material de aporte no es similar.

**Soldadura disimilar:** unión soldada de dos o más materiales metálicos no similares.



**Dilución:** es la cantidad de metal fundido proveniente del metal base que forma el cordón de soldadura.

**Aporte:** es la cantidad de material de aportación que forma parte del cordón de soldadura.

**Variables operáticas exógenas:** son las variables operativas que no formando parte del proceso condicionan el resultado del mismo.

Para la realización del procedimiento escrito de soldadura se utilizarán dos tipos de procesos de soldadura en función de su nivel de automatización:

- **Semiautomática:** proceso de soldadura donde las variables de proceso se fijan antes de realizar la unión y permanecen constantes.
- **Manual:** proceso de soldadura donde no hay variables fijadas de antemano y dependen principalmente del soldador.

**Cordón monopasada:** cordón de soldadura ejecutado de forma unívoca, es decir, se pasa por cada punto una única vez.

**Cordón multipasada:** cordón en cuya ejecución se pasa por la misma zona varias veces.

**Pasada de raíz:** es la primera pasada que se ejecuta en un cordón multipasada. Es la pasada que condiciona en mayor medida la calidad de la unión soldada. Se intenta conseguir un cordón de soldadura lo más similar posible al metal base. Por ello, para realizarla, se utilizan procesos de soldadura autógenos o con diluciones muy altas.

**Cordón de cierre:** última pasada de la unión soldada. Tiene microestructura de bruto de colada por lo que será de mayor fragilidad.

**Cordón de revenido:** pasada que se realiza con la unión soldada ya ejecutada y que por tanto no forma parte de ella. Su objetivo es tratar térmicamente al cordón de cierre.

**Corriente continua:** corriente que trabaja en una polaridad constante. Por tanto, el arco se establece una única vez y durante el proceso sólo hay que mantenerlo.

- **Polaridad directa:** el electrodo actúa como cátodo y el conjunto como ánodo. El arco se puede focalizar reduciendo su longitud. Se producen cordones estrechos y con gran penetración. Al ser un chorro plasmático más concentrado que el de la polaridad inversa se pueden utilizar longitudes de arco mayores.
- **Polaridad inversa:** el electrodo actúa como ánodo y el conjunto como cátodo. Los cordones serán más anchos y con menor penetración que



## Elaboración del Procedimiento Escrito de Ejecución y Control de Calidad de una Unión Soldada de Virolas de Acero



en el caso de la polaridad directa. Se pretende un efecto de decapado sobre el caldo.

**Corriente alterna:** corriente que cambia de polaridad cada ciclo. Por tanto, el arco se establece cada ciclo y es necesario un electrodo que favorezca su formación. Aparece como variable operativa la frecuencia de la corriente.



Elaboración del Procedimiento Escrito de Ejecución y  
Control de Calidad de una Unión Soldada de  
Virolas de Acero





# CAPÍTULO II. PROCESOS DE SOLDADURA

## 2.1.- PROCESOS DE SOLDADURA GENERALES

Dentro del mundo de la soldadura existen una gran variedad de procesos diferentes basados en diferentes principios. El primer rango diferenciador la fusión o no del material. Se distinguen dos tipos, welding (con fusión) y bonding (sin fusión). Para este ensayo solo se utilizarán procesos de soldadura con fusión ya que para virolas de acero son métodos que son menos complejos y tienen un menor coste. Dentro de los procesos de welding podemos distinguir la soldadura termoquímica, la eléctrica y los haces de alta energía. Dentro de estos tipos nos centraremos en los procesos de soldadura eléctricos descartando los procesos de soldadura por resistencia.

Dentro de los procesos de arco eléctrico existen varias opciones. Entre ellas están la soldadura por arco manual con electrodo revestido (SMAW), la soldadura por arco sumergido (SAW), la soldadura por arco bajo gas protector con electrodo consumible (GTAW), que engloba MIG (Metal Inert Gas) y MAG (Metal Active Gas) y, por último, la soldadura por arco bajo gas protector que engloba el proceso TIG (Tungsten Inert Gas Welding) y PAW (Plasma Arc Welding).

Al tratarse de planchas de acero de 10mm de espesor se utilizarán los procesos TIG y MAG. El proceso TIG se utilizará para realizar la pasada de raíz. Esta pasada debe ser de gran calidad ya que la calidad de la unión soldada depende en gran parte de la misma. También se busca la mayor dilución posible y el proceso TIG ofrece la posibilidad de realizar el proceso con o sin material de aportación. Por eso y porque el proceso TIG es el de mayor calidad será el utilizado frente al proceso SMAW, que es el otro proceso empleado en la realización de pasadas de raíz. Luego se realizarán varias pasadas, estas con el proceso MAG. Esto se debe a que es un proceso con un elevado factor de marcha que ofrece muy buenos resultados. Se utiliza el proceso MAG y no MIG ya que se trabaja con un acero al carbono. Además de por estas razones se utilizan estos procesos ya que están altamente extendidos dentro de la industria.

A continuación, se realizará una muy breve descripción de los procesos no seleccionados, pero también usados dentro de la calderería, y en apartados posteriores se entrará más en profundidad dentro de los procesos TIG y MAG.



## 2.1.1. SOLDADURA POR ARCO MANUAL CON ELECTRODO REVESTIDO

La soldadura por electrodos revestidos, *Shield Metal Arc Welding* (SMAW), se caracteriza porque se produce un arco eléctrico entre la pieza a soldar y un electrodo metálico recubierto. Por tanto, la energía térmica necesaria para llevar a cabo la unión soldada proviene del arco eléctrico. El siguiente esquema muestra los elementos principales del proceso:

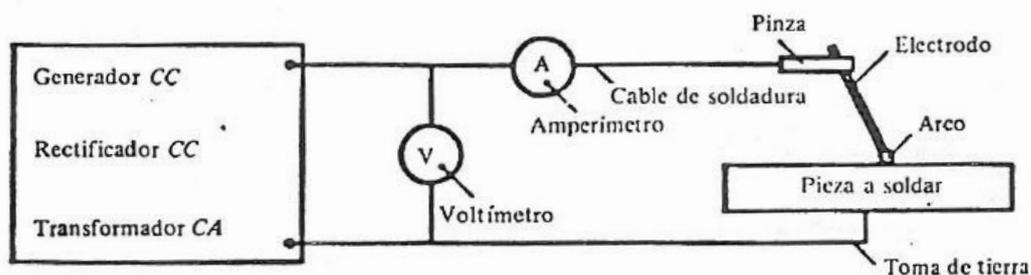


Fig. 2.1. Diagrama proceso SMAW

Con el calor producido por el arco se funde el electrodo y se quema el revestimiento produciéndose la atmósfera adecuada para la transferencia de las gotas del metal fundido desde el alma del electrodo hasta el baño de fusión. El electrodo forma parte del arco y durante el proceso se funde. Por tanto, este proceso nunca podrá ser autógeno.

En el arco las gotas de metal se proyectan recubiertas de escoria procedente del recubrimiento que, por efecto de su densidad, tensión superficial y viscosidad, flota en la superficie del caldo solidificando y formando una capa protectora del baño fundido. Transcurrido cierto tiempo esa escoria solidificada ha de ser eliminada

El material de aportación que se usa en el proceso SMAW se conoce como electrodo y consiste en una varilla metálica recubierta de un revestimiento concéntrico de flux extruido y seco. La parte central se conoce como alma y la exterior como revestimiento. En función de cada electrodo se formará un tipo de gota durante el proceso de soldeo.

El proceso SMAW es el más utilizado en la industria. Se utiliza por su versatilidad en una amplia gama de aplicaciones. Al tratarse de un proceso menos sensible al viento, en cuanto a la protección, se podrá utilizar tanto en taller como en obra. Las piezas a soldar deben tener un espesor superior a 1,5mm.



## 2.1.2.- SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO

El proceso de soldadura por arco sumergido, o *Submerged Arc Welding* (SAW), consiste en la fusión de un electrodo continuo, protegida por la escoria generada por un flux, granulado o en polvo, con el que se alimenta el arco por separado. El sistema es totalmente automático y permite obtener grandes rendimientos en producción.

El arco eléctrico se establece entre el electrodo metálico y la pieza a soldar. Como electrodos, pueden utilizarse uno o varios hilos simultáneamente, o bien, flejes o bandas en lo que se conocería como recargue u overlay.

El flux protege el arco y el baño de fusión de la atmósfera circundante, de tal manera que ambos permanecen invisibles durante el proceso. Parte del flux se funde con un papel similar al del recubrimiento en los electrodos revestidos: protege el arco, lo estabiliza, genera una escoria de viscosidad y tensión superficial adecuadas e incluso, permite añadir los elementos de aleación o compensar la pérdida de parte de ellos. El resto del flux, no fundido, puede recuperarse y reciclarse en el proceso.

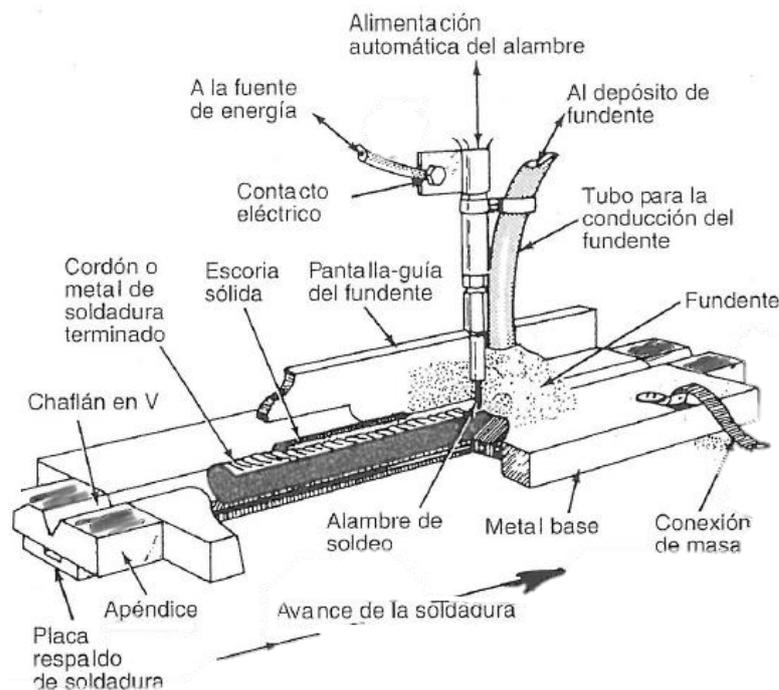


Fig. 2.2. Proceso SAW

Se trata de un proceso bastante versátil y se utiliza para unir materiales férricos y sus aleaciones. También se utiliza para recubrir materiales con objeto de resistir el fenómeno de corrosión, en el denominado "overlay".



Los fluxes son mezclas de compuestos minerales con diversos objetivos como la escorificación, viscosidad, desoxidación, ionización, etc. Existen dos tipos de flux: fundidos y aglomerados.

Dentro de la industria tiene varios campos de aplicación como la fabricación de tubería soldada en espiral, soldadura “tándem” de dos electrodos, el recubrimiento de materiales, etc.

### 2.1.3.- SOLDADURA MIG

Sus principios son los mismos que los de la soldadura MAG y se desarrollarán en los apartados siguientes. La principal diferencia entre los procesos MIG y MAG, también conocidos como semiautomáticos, es el gas de protección utilizado.

En la soldadura MIG se utilizarán gases inertes, mientras que en la MAG serán gases activos. Como principales gases inertes se encuentran el argón y el helio. En algunas ocasiones se pueden llegar a combinar con otros gases para conseguir las características de penetración y ancho del cordón deseadas.

Otra de las variables influenciadas por el proceso es la modalidad de transporte. En los procesos MIG el método de transporte más común es el denominado arco spray. Para que el arco se comporte de esta forma es necesario que:

1. La tensión del arco sea relativamente alta.
2. El hilo se encuentre conectado al polo positivo, es decir, trabajar con polaridad inversa.
3. Exista una elevada densidad de corriente.
4. El gas de protección debe ser argón, mezcla de argón con algo de oxígeno o de argón y dióxido de carbono.

El efecto de la polaridad inversa se traduce en una enérgica acción de limpieza sobre el baño de fusión, que resulta ventajosa en la soldadura de aceros con metales que produzcan óxidos pesados y difíciles de recudir como el aluminio y el magnesio. La penetración que se consigue es buena, por lo que se recomienda para soldar piezas de gran espesor. El baño de fusión es abundante y fluido.

A nivel industrial es un proceso muy utilizado por su elevado factor de marcha y gran productividad. Con este proceso se consiguen buenos acabados con una producción elevada. Está especialmente indicado para pasadas de relleno. Se adecúa para soldar aceros inoxidable, aluminios, cobres, níqueles y sus aleaciones.



## 2.1.4.- SOLDADURA POR PLASMA

La soldadura por arco plasma, *Plasma Arc Welding (PAW)*, utiliza los mismos principios que la soldadura TIG, por lo que puede considerarse como un desarrollo de este último. También puede ser autógeno. Sin embargo, tanto la densidad energética como las temperaturas aquí son mucho mayores.

En la soldadura PAW, la energía para conseguir la ionización la proporciona el propio arco eléctrico que se establece entre un electrodo de tungsteno, a veces aleado con torio, y el metal base, arco transferido, o entre el electrodo y la boquilla, arco no transferido.

Como soporte del arco se emplea un gas en estado de plasma, al que rodea con un gas de protección. El estado de plasma se alcanza al pasar el gas a través del orificio de la boquilla que estrangula el arco. Durante la ionización el gas se expande y aumenta su velocidad. Al chocar con la pieza libera la energía necesaria para la fusión. En el proceso TIG la columna del arco es libre de oscilar entre el extremo del electrodo y la pieza. En el PAW el chorro se concentra lo que reduce dos o tres veces la zona de impacto.

Una de las variantes más utilizadas del PAW es la técnica “*keyhole*”. Solo se puede utilizar en piezas de pequeño espesor.

El flujo de gas de plasma no suele ser suficiente para proteger de la atmósfera circundante al baño. Por esta razón se aporta un segundo gas, llamado de protección, que envuelve el conjunto. Este gas también tiene la función de refrigerar el cabezal de la pistola.

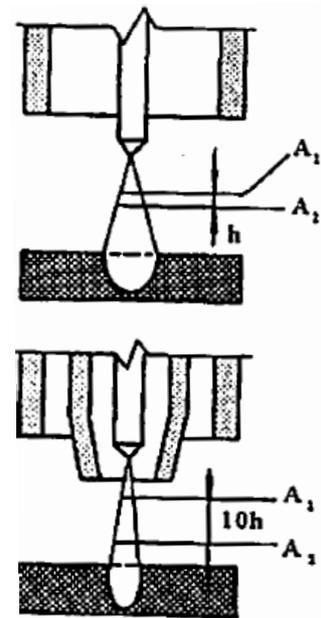


Fig. 2.3. Comparativa de los procesos TIG (arriba) y PAW (abajo)

## 2.2.- SOLDADURA POR ARCO BAJO GAS PROTECTOR TIG

El proceso de soldadura por arco bajo gas protector con electrodo no consumible, también llamado TIG, *Tungsten Inert Gas* o WIG, *Wolfram Inert Gas*, utiliza como fuente de energía el arco eléctrico que salta entre un electrodo no consumible y la pieza a soldar, mientras un gas inerte protege el baño de fusión. Es un proceso que puede ser autógeno donde la única función del electrodo es formar el arco. En caso de que hubiera material de



aportación se aplica mediante varillas y estas serían de una composición similar al metal base. La siguiente figura muestra esquemáticamente los principios del proceso TIG.

- A: Conducción de gas.
- B: Soporte de electrodo.
- C: Electrodo de Tungsteno no consumible.
- D: Gas de protección.
- E: Cordón de soldadura.
- F: Metal fundido.
- G: Arco.
- H: Metal de aportación.
- I: Metal base.

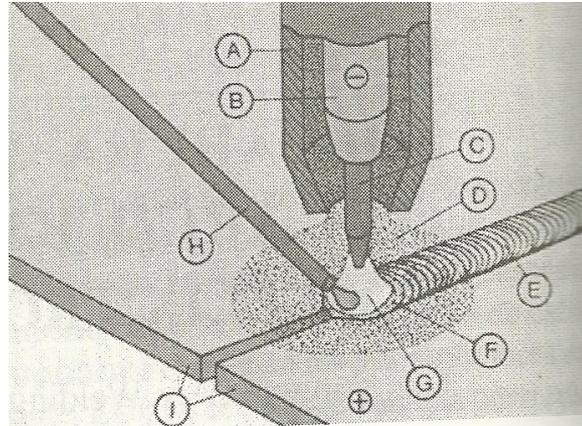


Fig. 2.4. Proceso TIG

Con este proceso se consiguen las uniones soldadas de mayor calidad. La zona afectada térmicamente es pequeña y el input térmico está muy controlado. Con ello se consiguen minimizar las tensiones y deformaciones provocadas por el proceso de soldadura. Es un proceso muy versátil pudiendo soldar infinidad de materiales en gran cantidad de posiciones. Es muy sensible a los cambios de cualquier variable del proceso por lo que es muy importante controlarlas.

Se aplica principalmente a los aceros inoxidable, al cromo-molibdeno, que es el que se va a estudiar, resistentes al calor, aluminio, níquel y sus aleaciones. Es ideal para soldaduras de alta responsabilidad debido a su gran calidad y exención de defectos.

Su uso está extendido a soldaduras de pequeños espesores debido a su elevado coste por la baja tasa de deposición del proceso. A partir de 4mm es necesario el uso de material de aporte y es impensable la realización de soldaduras TIG de más de 8 mm.

Es un proceso utilizado en todo tipo de industrias, especialmente para la realización de pasadas de raíz. Sin embargo, es el más caro y complejo de llevar a cabo.

### 2.2.1.- GASES DE PROTECCIÓN

Los gases más utilizados en soldadura TIG son el Helio, el Argón y mezclas de ambos. Tradicionalmente el argón ha sido más utilizado en Europa y el Helio en Estados Unidos. Esto se debe, principalmente, a los costes de obtención de cada gas. Debido a su diferente densidad,



conductividad y energía de ionización producirán cordones de soldadura diferente.

### Argón

Su densidad es elevada lo que proporciona al arco una notable protección. Posee una energía de ionización baja. Esto facilita el cebado del arco y origina arcos estables con pocas proyecciones. Al necesitar tensiones reducidas produce, consecuentemente, arcos poco energéticos, resultando más productivo para la soldadura de piezas de pequeño espesor.

Se caracteriza por una baja conductividad térmica, que da lugar a una gran concentración de calor en la vena central del arco, produciéndose mayores penetraciones.

### Helio

Su densidad es menor que la del argón. Por ello se ha de utilizar un caudal de helio dos o tres veces superior al de argón para proporcionar al arco la misma protección.

Por el contrario, la energía de ionización del helio es más alta que la del argón. Ello ofrece dificultades para el cebado y la estabilidad del arco, pero por esa misma razón, al requerir elevadas tensiones de arco, aporta mayores energías a igual intensidad. Por tanto, resulta recomendable cuando se requieren elevados aportes térmicos.

La conductividad térmica del helio es unas nueve veces superior a la del argón. Por este motivo la distribución de temperaturas en el arco es homogénea, dando lugar a cordones más anchos y penetración uniforme. Por contra, buena parte del calor y, por tanto, de la energía aportada en el arco, se pierde por radiación y no se transmite a la pieza, produciendo una penetración inferior a la que se consigue con el argón.

En definitiva, el helio producirá cordones anchos con poca penetración mientras que el argón producirá cordones muy estrechos con gran penetración. Esto se puede observar en la figura.

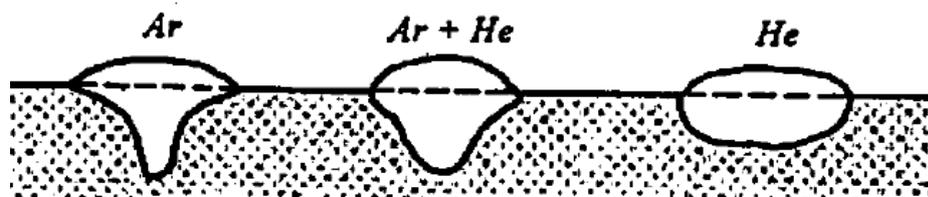


Fig. 2.5. Cordón de soldadura según gas protector



## Mezcla Ar/He

La mezcla de estos dos gases inertes ofrece prestaciones en función de la proporción en la que interviene cada uno de ellos. La penetración es intermedia entre las típicas de cada gas puro.

Cuando las longitudes de arco son muy grandes el baño puede quedar desprotegido. Una posible solución es la utilización de gases como el hidrógeno. Esto produce un arco más energético y además permite aumentar la velocidad de ejecución. Se debe tener precaución con el uso del hidrógeno ya que aleaciones como el acero inoxidable son susceptibles a la fragilización.

### 2.2.2.- ELECTRODO NO CONSUMIBLE

El electrodo sobresale por encima de la boquilla de aporte de gas. Esto permite controlar mejor la longitud de arco, pero lo deja expuesto a golpes y a un posible contacto con la unión soldada. Su única misión es la de mantener el arco, sin aportar material al baño de fusión. Por este motivo, y para evitar su desgaste, es muy importante que posea una alta temperatura de fusión. Además, el electrodo debe ser muy resistente a la abrasión, con bajo coeficiente de dilatación térmica, con conductividad térmica y eléctrica razonables.

Inicialmente los electrodos eran de tungsteno puro, pero posteriormente se comenzó a aditivar óxidos refractarios para favorecer la estabilidad del arco además de alargar su vida útil. El más común es el electrodo de tungsteno aleado con torio.

En la actualidad se están desarrollando electrodos compuestos. Estos constan de un núcleo de tungsteno y un revestimiento formado por un óxido. El mayor inconveniente de estos electrodos es que no pueden ser afilados y una vez dañada su morfología son inservibles.

La forma del extremo del electrodo es importante pues, si no es la correcta, existe el riesgo de que el arco eléctrico sea inestable. La punta del electrodo debe tener entre 1.5 y 2 veces de longitud el diámetro del electrodo, o lo que es lo mismo, unos 30°. Un mal afilado provoca un arco errático con un baño ancho y poca penetración. Por el contrario, un afilado excesivo implica riesgo de inclusiones de tungsteno en el baño.

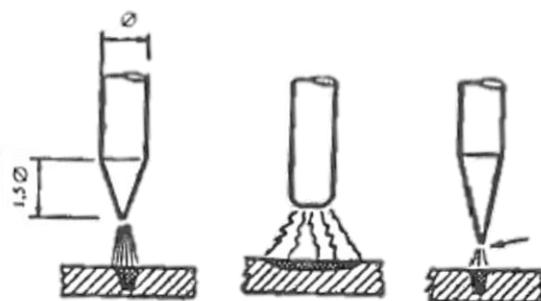


Fig. 2.6. Acabados de los electrodos



### 2.2.3.- SELECCIÓN DEL TIPO DE CORRIENTE

El proceso TIG puede utilizarse tanto en corriente continua como en corriente alterna. La elección de la corriente y polaridad, se hará en función del material a soldar.

#### Corriente Continua

Cuando se utiliza la polaridad directa, o sea, el electrodo es el cátodo, la energía del arco se concentra fundamentalmente en la pieza, por lo que se obtiene un rendimiento térmico relativamente aceptable y una buena penetración. Por otra parte, el electrodo soporta intensidades del orden de 8 veces mayores que si se trabajase en polaridad inversa, sin fundirse ni deteriorarse. Podemos observarlo en la figura 2.7.A.

Si se invirtiera la polaridad, figura 2.7.B., el reparto térmico es menos favorable, lo que se traduce en un baño relativamente ancho, con poca penetración y una excesiva acumulación de calor en el electrodo, que provoca su sobrecalentamiento y rápido deterioro, incluso a bajas intensidades de corriente. De acuerdo con esto, la polaridad recomendada en corriente continua es la directa. No obstante, resulta impracticable cuando se sueldan aleaciones ligeras de aluminio y magnesio, por la formación de una capa de óxidos refractarios. Este problema no se observa con polaridad inversa.

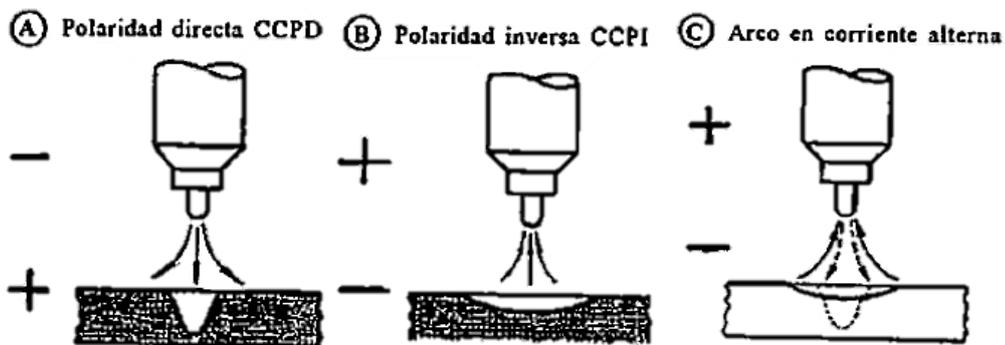


Fig. 2.7. Tipos de corriente proceso TIG

Como podemos observar en la 2.7.A., hay buena penetración para la polaridad directa mientras que, para la polaridad inversa, figura 2.7.B., la penetración es menor, pero se limpia la superficie del baño.

En la 2.7.C. podemos observar un arco en corriente alterna donde la polaridad cambia constantemente. En un periodo “enfria” el electrodo y en otro limpia el baño. Soporta una intensidad intermedia entre la corriente continua con polaridad inversa y la corriente continua con polaridad directa.



## Corriente Alterna

La corriente alterna aúna, aunque reducidas, las ventajas de las dos polaridades. El buen comportamiento durante el semiciclo de polaridad directa y el efecto decapante del baño durante el semiciclo de polaridad inversa, por lo que suele emplearse en el soldeo de aleaciones ligeras.

Como principales inconvenientes presenta dificultades de cebado y estabilidad del arco, que obliga a incorporar al equipo un generador de alta frecuencia.

Debido a su versatilidad el equipamiento para la soldadura TIG es el más complejo de todos. Esto se debe a que debe poder trabajar tanto en corriente continua como en corriente alterna. Son muy caros. El equipo se puede dividir a su vez en tres subsistemas. Uno subsistema eléctrico, uno de aporte de gas y otro de refrigeración del portaelectrodos, que en este caso es imprescindible.

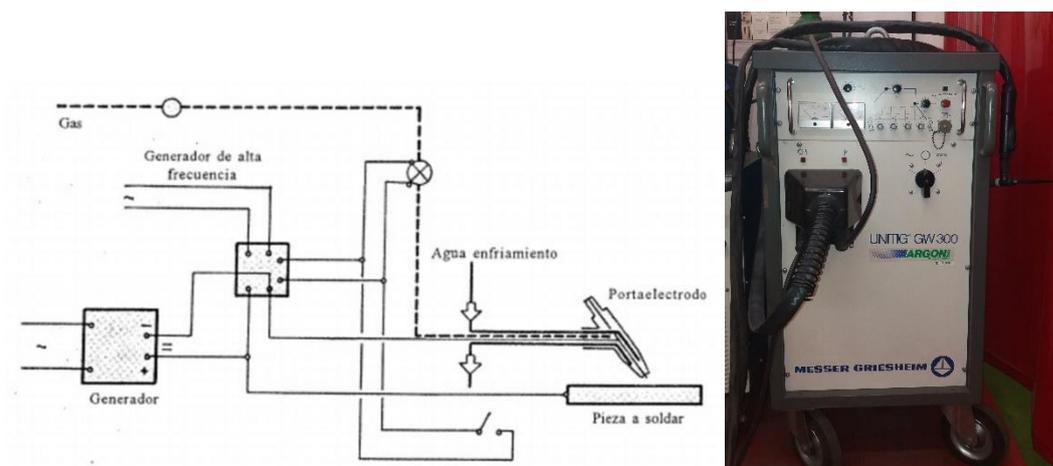


Fig. 2.8. Instalación para soldadura TIG.

## 2.2.4.- TIG PULSADO

Se trata de una variante del proceso TIG en la que la corriente de soldadura varía cíclicamente entre un nivel mínimo -corriente de base-, y un nivel máximo -corriente de pico-, a frecuencias que dependen del trabajo a realizar. La corriente de pico suele ser unas cuatro veces mayor que la corriente de base.

Esta técnica facilita el control del baño de fusión y la zona afectada térmicamente. Permite ajustar con bastante precisión la energía aportada, por lo que suele emplearse en la soldadura de espesores muy finos y en uniones que presente una gran dificultad operatoria.



## 2.3.- SOLDADURA POR ARCO BAJO GAS PROTECTOR CON ELECTRODO CONSUMIBLE MAG

En la soldadura por arco bajo gas protector con electrodo consumible, *Gas Metal Arc Welding*, *GMAW*, el arco se establece entre un electrodo de hilo continuo y la pieza a soldar, protegidos de la atmósfera circundante por un gas inerte, proceso *MIG*, *Metal Inert Gas*, o por un gas activo, proceso *MAG*, *Metal Active Gas*. Durante este apartado nos centraremos en el estudio del proceso *MAG*. Por tanto, el electrodo se convierte en material de aporte y no hay posibilidad de que sea un proceso autógeno. Una de sus mayores ventajas es su velocidad de ejecución, hasta 100 cm/min. Con estos procesos se consiguen soldaduras de buena calidad con alta repetitividad. Están muy enfocados en el uso de pasadas de relleno. Sin embargo, la ausencia de escoria limita las posiciones de uso. Además, se han de soldar materiales similares ya que no se podrán adicionar elementos por la ausencia del revestimiento.

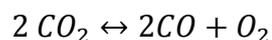
### 2.3.1.- GASES DE PROTECCIÓN

La naturaleza del gas de protección es muy importante, puesto que influye notablemente en:

- la cantidad de energía aportada;
- tipo de transferencia;
- penetración;
- velocidad de soldeo;
- aspecto del cordón;
- probabilidad de proyecciones y mordeduras.

#### Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)

Es un gas activo, de carácter oxidante, que a la elevada temperatura del arco tiene tendencia a disociarse de acuerdo con la siguiente reacción:



No se debe utilizar en soldadura de aceros al Cr-Mo por el riesgo de oxidación del cromo, tanto del metal base como del aportado en el hilo, ni en la de los aceros inoxidable austeníticos, pues favorecería la generación de carburos de cromo,  $Cr_{23}C_6$ , con la consiguiente pérdida de resistencia a la corrosión, como tendremos ocasión de comprobar.

Es el único gas que puede utilizarse individualmente como atmósfera protectora en la soldadura de acero al carbono. Mucho más barato que el argón, entre sus otras ventajas se encuentran la de conseguir penetraciones



más profundas y anchas en el fondo del cordón, lo que mejora su contorno, y también la de reducir el riesgo de mordeduras y faltas de fusión.

El inconveniente está en que se producen arcos relativamente energéticos, que suelen provocar proyecciones. Su elevada conductividad térmica en relación con el argón producirá en sus mezclas un incremento en la penetración.

### **Argón + Dióxido de Carbono**

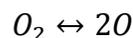
Cuando se trata de soldar chapas de aceros al carbono y baja aleación se utilizan usualmente mezclas de argón con proporciones de CO<sub>2</sub> que van del 15 al 25%. Con estas mezclas se consigue:

- mejor visibilidad del baño;
- arco más suave, con menos turbulencias;
- baño de fusión más frío;
- mejor aspecto del cordón;
- menos proyecciones;
- más fácil regulación.

El único inconveniente de la mezcla es de tipo económico. Sin embargo, hay que comparar la incidencia del valor del gas en el coste final de la soldadura y, por otra parte, la mejora del “*factor de marcha*” y la obtención de mejores características mecánicas en la unión soldada.

### **Oxígeno**

Es un gas activo, de carácter muy oxidante, que se combina directamente con muchos elementos produciendo reacciones exotérmicas. A la temperatura del arco se disocia, de acuerdo con la siguiente reacción:



Su presencia conduce a la destrucción por combustión de elementos de aleación. Tiende a producir más escorias o silicatos en la superficie del baño de fusión. Reduce la tensión superficial del metal fundido, produciendo baños muy fluidos.

### **Hidrógeno**

Es un gas activo, de carácter reductor, que favorece la eliminación de óxidos. Por su carácter fragilizante en los aceros de naturaleza ferrítica puede provocar la fisuración en frío si se asocia a fuertes embridamientos y estructuras metalúrgicas de naturaleza martensítica. Incrementa el aporte



térmico y mejora el efecto de mojado del cordón. Mezclado hasta un 10% de Ar o He, mejora la penetración y aumenta la velocidad.

### 2.3.2.- MATERIAL DE APORTACIÓN

En la soldadura *MIG/MAG*, el electrodo consiste en hilo continuo, macizo o tubular, de diámetros que oscilan normalmente entre 0.6 y 1.6mm. Se presentan arrollados, al azar o por capas, en bobinas de 15 Kg. El hilo suele estar recubierto de cobre para favorecer el contacto eléctrico con la boquilla, disminuir rozamientos y protegerlo de la oxidación.

En general, la composición del hilo macizo suele ser similar a la del metal base. No obstante, para su elección hay que tener en cuenta la naturaleza del gas protector, por lo que se debe seleccionar la pareja hilo-gas.

Generalmente, la selección del diámetro del hilo macizo se realiza en función del espesor de chapa a soldar, de parámetros característicos de la corriente eléctrica, velocidad de alimentación del hilo y su tasa de deposición.

### 2.3.3- SELECCIÓN DEL TIPO DE CORRIENTE

#### 2.3.3.1- POLARIDAD

Afecta al modo de transferencia, penetración, velocidad de fusión del hilo, etc. Normalmente se trabaja en polaridad inversa, excepto en la soldadura con alambres tubulares autoprotégidos con los que suele trabajarse con polaridad directa. En la figura 2.11. podemos observar la influencia de la polaridad en la penetración.

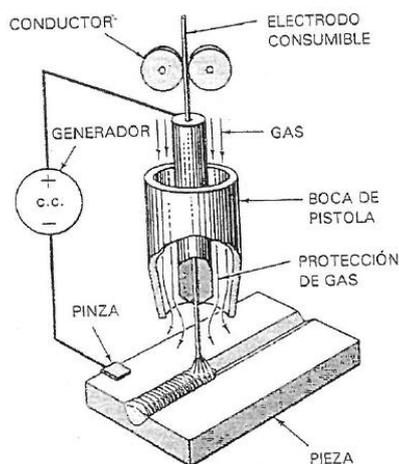


Fig. 2.10. Soldadura GTAW

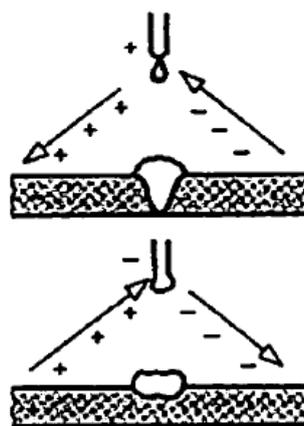


Fig. 2.11. Influencia de la polaridad en la soldadura GTAW.

Arriba: polaridad inversa

Abajo: polaridad directa



### 2.3.3.2.- TENSIÓN DEL ARCO

A diferencia de los procesos SMAW y GTAW, que trabajan con equipos de intensidad constante, este proceso utiliza equipos de tensión constante, por lo que este parámetro se puede regular a voluntad desde el propio generador, mantenerse constante aun variando dentro de unos límites la velocidad de alimentación del hilo, resultando determinante en el modo de transferencia del metal fundido al baño de fusión. Estos equipos regulan la velocidad de alimentación del hilo para mantener constante el arco eléctrico y la tensión.

### 2.3.3.3.- MODALIDAD DE TRANSPORTE

#### Arco Corto o Cortocircuito

Es típico del proceso MAG. El extremo del hilo se funde formando una gota que se va alargando hasta que toca el metal base. En ese momento se produce un cortocircuito, aumenta mucho la intensidad, y la gota cae reanudándose el arco. Para que un arco funcione de esta manera es necesario que:

- La tensión del arco sea relativamente baja.
- El hilo se encuentre conectado al polo positivo, es decir, trabajar con polaridad inversa.
- Exista una baja densidad de corriente.
- El gas de protección debe ser dióxido de carbono o mezclas de CO<sub>2</sub> con argón.

Es un método menos energético y que necesita una menor tensión y amperaje. Esto se debe al uso del CO<sub>2</sub> como gas de protección. Al disociarse el gas calienta el baño siendo menor la energía térmica necesaria proveniente del arco eléctrico. Produce una gota gruesa por lo que el baño es escaso y fácil de controlar. Esto permite soldar en posiciones como la posición en cornisa o bajo techo.

En la figura 2.12 podemos ver el modo de transferencia mientras en la figura 2.13. podemos ver el proceso de forma más detallada.

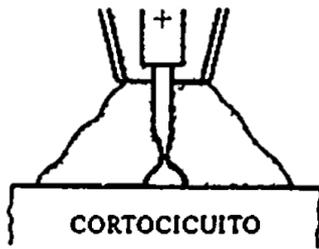


Fig. 2.12. Transferencia mediante arco corto o cortocircuito

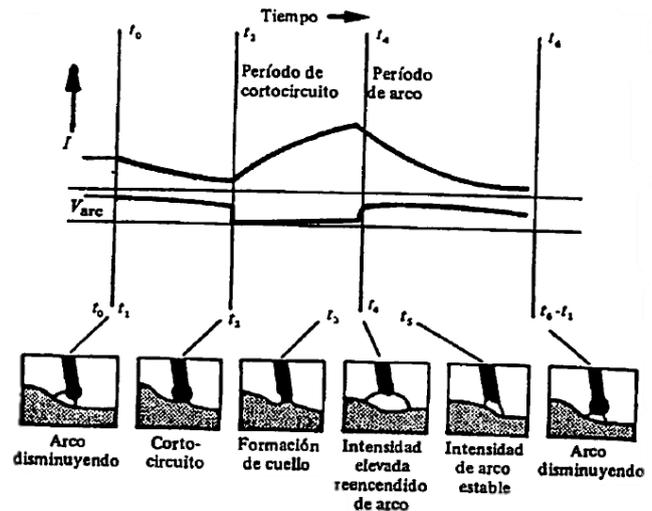


Fig. 2.13. Secuencia cortocircuito

### Arco Pulsado

Se superponen dos corrientes: una, ininterrumpida y de débil intensidad llamada *corriente de base*, cuyo destino es proporcionar al hilo la energía calorífica necesaria para su fusión y la otra, llamada *corriente de pico*, constituida por una sucesión de pulsaciones a idéntica frecuencia. Cada pulsación eleva la intensidad y provoca la proyección de una gota de metal del mismo diámetro. La corriente de pico es aproximadamente cuatro veces mayor que la corriente de base.

Los equipos para arco pulsado permiten controlar en mayor grado la energía puesta en juego. Con ello se consigue, a su vez, un mayor control de la zona afectada térmicamente, de la microestructura, de las deformaciones, tensiones residuales, etc. Además, ese control energético permite regular la magnitud del baño por lo que es posible soldar en posiciones complicadas.



### 2.3.4.- INSTALACIÓN MAG



Fig. 2.14. Equipo de soldadura MIG/MAG

En la figura 2.15 se muestra el esquema de una instalación para soldadura GMAW, que consta de los siguientes elementos básicos:

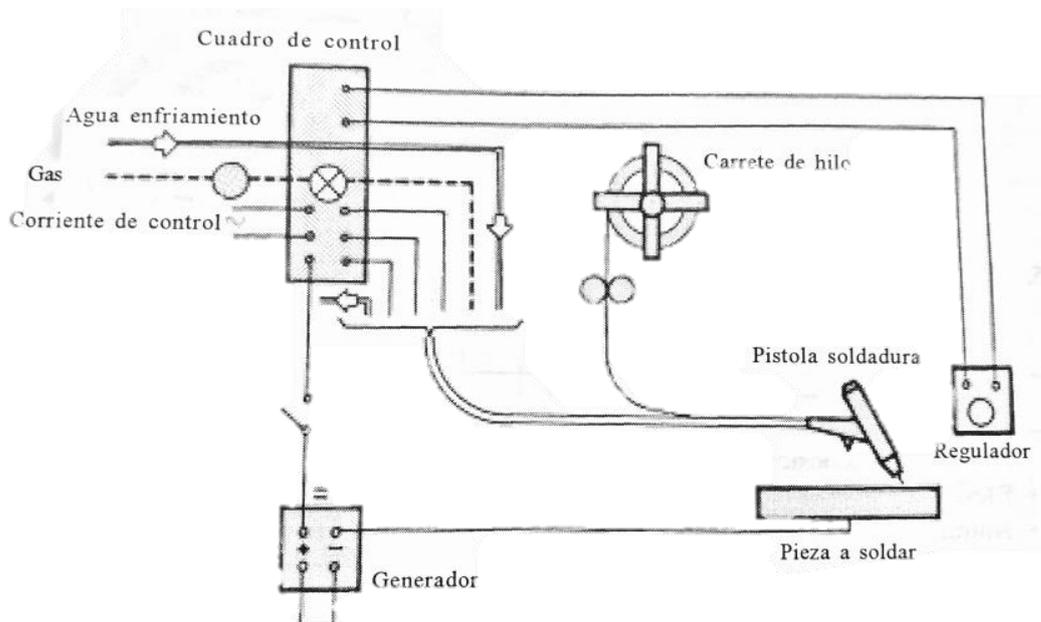


Fig. 2.15. Instalación para soldadura GMAW

Como elementos principales incluye un generador de corriente, una unidad de alimentación del hilo, un circuito de gas protector, pistola de soldadura, conjunto de válvulas y órganos de control. Solo si las condiciones lo requieren constaría con un circuito de refrigeración.



# CAPÍTULO III. DEFECTOLOGÍA EN UNIONES SOLDADAS

## 3.1.- FISURAS Y GRIETAS

Se define una fisura como una discontinuidad física, producida por una rotura local, que no aflora a la superficie. Puede ser provocada por un enfriamiento inadecuado o por tensiones en la pieza. Normalmente las fisuras derivan en grietas. Existen diferentes tipos de grietas:

- **Microgrieta:** grieta de dimensiones microscópicas.
- **Grieta longitudinal:** grieta cuya dirección es aproximadamente la del eje de soldadura.
- **Grieta transversal:** grieta cuya dirección es sensiblemente perpendicular al eje de soldadura.
- **Grieta radial:** grietas aisladas cuyo origen es un punto común. Cuando estas grietas son pequeñas, se conocen como “star cracks”.
- **Grieta de cráter:** grieta originada en un cráter de soldadura y que puede ser a su vez longitudinal, transversal o en estrella.
- **Grietas discontinuas:** grupo de grietas orientadas de cualquier forma.
- **Grietas ramificadas:** grupo de grietas ligadas entre sí, que se presentan en forma arborescente a partir de una fisura común.

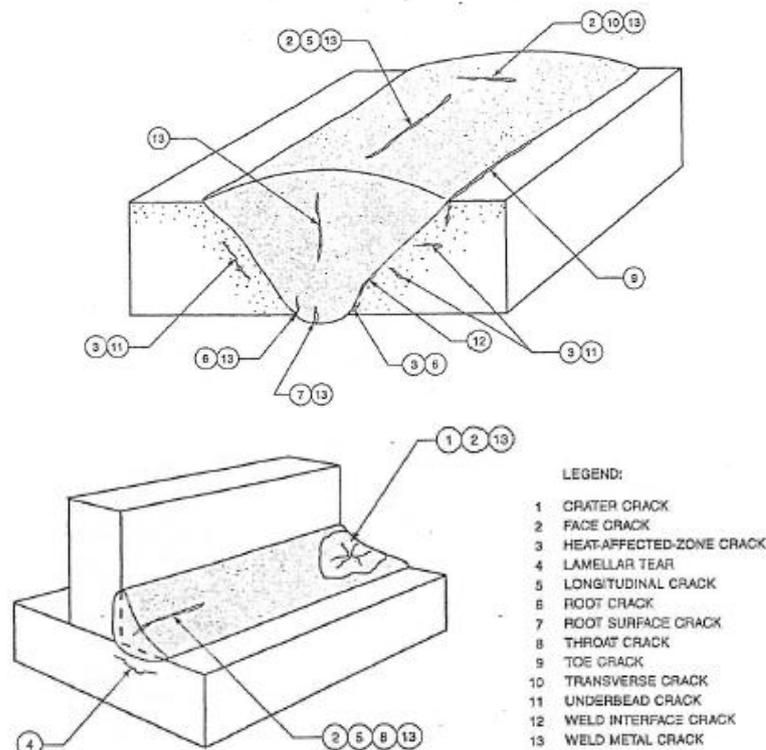


Fig. 3.1. Tipos de grietas



Las causas más probables de las grietas pueden ser:

- Excesiva rigidez de la pieza.
- Uso de electrodos inapropiados.
- Enfriamiento brusco del cordón de soldadura. Puede deberse a un precalentamiento insuficiente o causas externas como lluvia, bajas temperaturas, etc.

La grieta puede generarse durante el proceso de soldadura, durante el tratamiento si lo hubiera o incluso durante el periodo inicial del servicio si la unión está sometida a tensiones.

Las grietas que suponen un mayor peligro son las grietas superficiales perpendiculares a la dirección de máxima sollicitación. Las fisuras, aunque menos peligrosas, pueden extenderse y abrirse al exterior en condiciones de sobreesfuerzo o fatiga. En el caso relativo a recipientes a presión no se admiten grietas ni superficies ya que su crecimiento puede dar origen a roturas catastróficas.

### 3.2.- CAVIDADES Y POROSIDAD

Entre los defectos más comunes de este tipo se pueden encontrar los siguientes:

- **Sopladura:** cavidad formada por inclusiones gaseosas.
- **Poro esferoidal:** sopladura de forma sensiblemente esférica. Esta porosidad puede estar localizada en una zona del cordón o distribuida regularmente a lo largo del mismo.
- **Porosidad alineada:** poros distribuidos paralelamente al cordón de soldadura.
- **Poro alargado:** poro grande no esferoidal, cuya dimensión principal es paralela al cordón.
- **Porosidad vermicular:** cavidades alargadas o tubulares producidas por el escape de gas. La forma y posición de las cavidades está determinada por el modo de solidificación y origen del gas.
- **Picadura:** poro de pequeña dimensión abierto a la superficie.
- **Rechupe:** cavidad debida a la concentración de metal en el momento de la solidificación.
- **Rechupe interdendrítico:** cavidad de forma alargada que se produce entre dendritas, durante el enfriamiento y por retención de gases.
- **Rechupe de cráter:** cavidad o depresión producida al final del cordón producida por un mal levantamiento del electrodo. Para evitar su



aparición, al llegar al final del cordón, se ha de retroceder a la vez que se separa el electrodo.

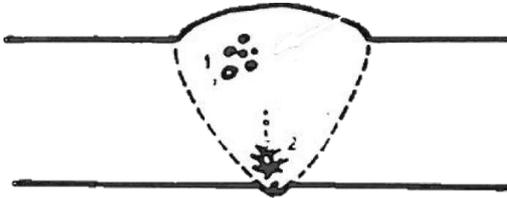


Fig. 3.2. Cavidades y porosidad

1. Sopladuras
2. Rechufe cerrado

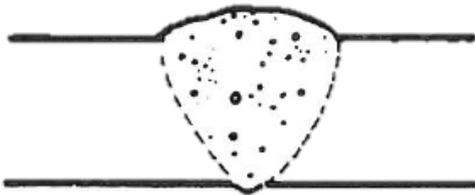


Fig. 3.3. Porosidad esférica



Fig. 3.4. Porosidad vermicular

Existen varias causas probables en función del proceso y del material base a soldar.

Este tipo de discontinuidades se producen en piezas con un excesivo contenido en carbono, azufre o fósforo. Otra posible causa correspondiente al metal base puede ser la falta de limpieza de los bordes de la unión, que pueden incluir óxidos.

Si la unión se realiza mediante el proceso SMAW las causas pueden ser un electrodo demasiado caliente, un revestimiento húmedo o el empleo de electrodos con el extremo desprovisto de revestimiento.

Si el proceso a utilizar es un proceso semiautomático (GMAW) las causas pueden ser el uso de un caudal incorrecto, una mala posición de la pistola, ajuste incorrecto al tubo de contacto, etc.

Unos fallos comunes a todos los procesos y que originan este tipo de defectos son el uso de una longitud de arco excesiva o una mala técnica operatoria.

El gas que más comúnmente se encuentra encerrado en los poros es el CO, derivado de la reacción entre el C y el FeO. Que el metal aportado presente una ligera porosidad no es un defecto grave ya que no provoca una gran intensificación de tensiones, al menos que se encuentre en superficies críticas. Este defecto, no obstante, implica una mala ejecución de soldeo y una reducción de la sección resistente de la unión.



### 3.3.- INCLUSIONES SÓLIDAS

Se pueden distinguir varios tipos:

- **Inclusión sólida:** elemento sólido atrapado en el cordón y que tiene efectos perjudiciales para la unión.
- **Inclusión de escoria:** residuo de escoria aprisionada en el cordón.
- **Inclusión de óxido:** óxido metálico atrapado en el cordón de soldadura durante la solidificación.
- **Capa de óxido:** película de óxidos metálicos formados por la falta de protección y aprisionados en forma estratificada debido a la turbulencia del caldo metálico.
- **Inclusión metálica:** partícula de metal ajena a la unión aprisionada en el cordón de soldadura.

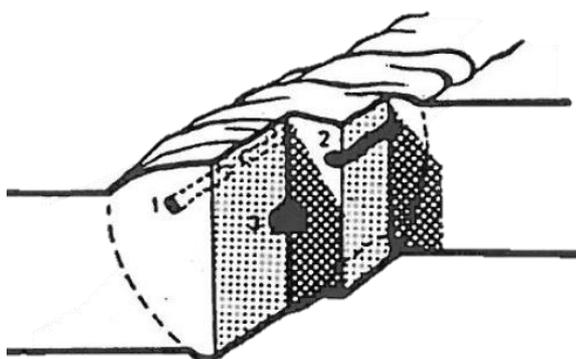


Fig. 3.5. Inclusiones de escoria

1. En cadena
2. Alargadas
3. Redondeadas

Las causas más comunes son la falta de limpieza de los cordones en cordones multipasada, cordones mal distribuidos, inclinación incorrecta del electrodo o intensidad muy débil.

La importancia de este defecto depende del tamaño de la inclusión y la distancia entre inclusiones. Si dos inclusiones están próximas entre sí, y la unión está sometida a esfuerzos, es posible que el material del cordón no lo soporte y se combinen ambos defectos formando uno mayor.

### 3.4.- FALTA DE FUSIÓN

La falta de fusión es la falta de unión que se da entre el metal de aportación y el metal base o entre dos capas contiguas de metal de aportación. Hay tres tipos de falta de fusión:

- Falta de fusión lateral que afecta a los bordes a unir (4011).

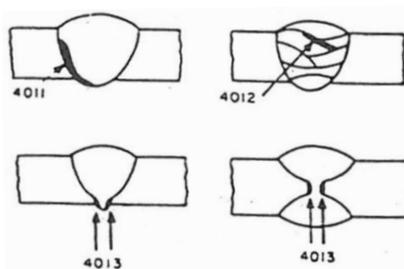


Fig. 3.6. Tipos de falta de fusión



- Falta de fusión entre pasadas (4012).
- Falta de fusión en la raíz de la soldadura (4013).

Las causas más probables son una mala preparación de bordes o una insuficiencia energética debida a un arco demasiado largo, una intensidad muy débil o una excesiva velocidad de avance del electrodo.

Una unión realizada totalmente con insuficiencia energética es peligrosa ya que el cordón tiene el aspecto de un cordón sano y no es detectable por inspección radiográfica. La causa física del defecto es que no se alcanza la temperatura adecuada para la fusión del metal base y el de aportación.

Su efecto es equivalente al de una entalla aguda que se comporta como iniciador de fisuras y suele derivar en rotura. Se puede detectar mediante ultrasonidos o ensayos destructivos. La falta de fusión reduce notablemente la resistencia a fatiga. Si se produce en la pasada de raíz da lugar a una corrosión localizada en medios agresivos.

### 3.5.- FALTA DE PENETRACIÓN

Es la fusión parcial de los bordes de las piezas a unir, que da lugar a una discontinuidad entre los mismos.

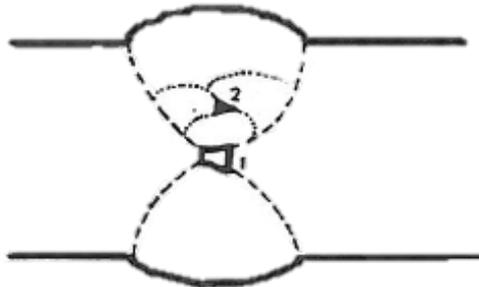


Fig. 3.7. Falta de penetración

1. En la raíz
2. Entre pasadas

Las causas más probables de la falta de penetración son:

- Separación de bordes incorrecta.
- Diámetro del electrodo demasiado grueso.
- Excesiva velocidad de avance.
- Baja intensidad.

El espacio no ocupado por la falta de penetración origina fuertes tensiones y además suele ser origen de corrosión localizada. Este defecto provoca una notable reducción de la resistencia a la fatiga.



### 3.6.- DEFECTOS DE FORMA

Como defectos de forma aparecen los siguientes:

- **Forma defectuosa:** falta de conformación de orden geométrico de la superficie externa con relación al perfil correcto. Es decir, falta de alineación.
- **Mordedura:** falta de metal, en forma de surco, en los bordes del cordón de soldadura.
- **Mordedura en la raíz:** insuficiencia de metal en los bordes laterales de la raíz, provocada por contracción del cordón de soldadura.
- **Sobreepesor excesivo:** exceso de metal depositado en las pasadas finales.
- **Exceso de penetración:** exceso de metal en la raíz de un cordón ejecutado por una sola cara en una o varias pasadas.
- **Goterón:** exceso de penetración localizada.
- **Ángulo del sobreepesor incorrecto:** valor excesivo del ángulo formado por el plano tangente al metal base y el plano tangente al cordón de soldadura pasando por la línea de unión.
- **Desbordamiento:** exceso de metal depositado que se solapa en la superficie del metal base, sin unión íntima.
- **Defecto de alineación:** diferencia de nivel entre dos piezas soldadas.
- **Deformación angular:** ángulo de las piezas soldadas diferente al previsto.
- **Hundimiento:** desplazamiento del cordón, debido a una fusión excesiva que origina un exceso o una falta de metal.
- **Hueco:** hundimiento del baño de fusión, que da lugar a la perforación de la soldadura.
- **Falta de espesor:** insuficiencia local o continua del metal depositado, que origina un perfil del cordón contraído en relación al perfil correcto.
- **Anchura o superficie irregular:** falta de regularidad en la anchura o la superficie del cordón a lo largo del mismo.
- **Rechupe de raíz:** falta de espesor en la raíz de la unión soldada, debido a una contracción del cordón.
- **Quemado:** formación esponjosa en la raíz debida a la ebullición del caldo en el momento de su solidificación.
- **Empalme defectuoso:** irregularidad local de la superficie del cordón en la zona de empalme.

Las causas más probables de la mordedura son:

- Electrodo demasiado grueso.
- Manejo inadecuado del electrodo con una inclinación incorrecta.



## Elaboración del Procedimiento Escrito de Ejecución y Control de Calidad de una Unión Soldada de Virolas de Acero



- Intensidad excesiva.

Este defecto es grave en uniones sometidas a esfuerzos cortantes, pues la mordedura supone una entalla física y puede ser origen de roturas.

Las causas más probables del exceso de penetración son:

- Separación de bordes excesiva.
- Intensidad demasiado elevada al depositar el cordón de raíz.
- Velocidad muy pequeña de avance.
- Diseño de junta defectuoso.

Este defecto puede ser grave cuando un líquido corrosivo circule por el interior de una conducción y choque con el descuelgue del exceso.



Elaboración del Procedimiento Escrito de Ejecución y  
Control de Calidad de una Unión Soldada de  
Virolas de Acero





## **CAPÍTULO IV. CONTROL DE CALIDAD**

Para la realización del control de calidad se utilizarán una serie de ensayos, tanto destructivos como no destructivos, donde se comprobará la calidad de la soldadura y su adecuación para ser utilizada como virola o recipiente. Todo ello cumpliendo con la normativa vigente. En el caso de este estudio se seguirán las indicaciones del Artículo IX del código ASME.

### **4.1.- ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y TECNOLÓGICOS APLICADOS EN LAS UNIONES SOLDADAS**

Para este estudio los ensayos que se llevarán a cabo serán los de tracción, doblado, dureza Vickers y resiliencia mediante el método Charpy. Se han escogido estos ensayos siguiendo las recomendaciones del código ASME, ya que permiten una mejor y más precisa caracterización del material. Para materiales dúctiles el ensayo de tracción es el principal para la caracterización de las propiedades mecánicas del material. Dentro de los de dureza se podrá utilizar el ensayo Vickers o el ensayo Brinell por tratarse de un acero con contenido medio en carbono.

#### **4.1.1.- ENSAYO DE TRACCIÓN**

El ensayo de tracción es un ensayo englobado dentro de los denominados ensayos destructivos. Este ensayo estudiar el comportamiento de un material sometido a un esfuerzo de tracción progresivamente creciente hasta llegar a la rotura. La probeta experimenta un aumento de longitud y disminución de su sección durante el ensayo.

La forma más común de representación y estudio de este ensayo es la curva esfuerzo-deformación, también conocida como curva ingenieril. En ella se representa gráficamente la relación entre la tensión normal unitaria y la deformación longitudinal. A partir de este diagrama se pueden obtener las características elásticas y mecánicas de la unión soldada.

Este ensayo es de utilidad para conocer las características elásticas y mecánicas de un material y así poder definir los coeficientes de seguridad y los estados límite que aseguren el correcto funcionamiento y el periodo de vida útil asignado a la pieza soldada, o al conjunto en el que se encuentre inserta. Es uno de los ensayos más utilizados en la industria, sobre todo cuando se desean conocer las características mecánicas del material.

#### **4.1.2.- ENSAYO DE DOBLADO**

Su finalidad es la de estudiar las características de plasticidad de los materiales metálicos. Para ello se doblan probetas normalizadas. Se observa



si aparecen grietas en la parte exterior de la curva, donde los esfuerzos de tracción son más elevados. La no aparición de las grietas denota una buena plasticidad. Este es un ensayo especialmente usado en uniones soldadas. Esto es así porque se desea conocer el efecto que produce el calor del proceso de soldadura sobre la capacidad de deformación del material.

El ensayo se ha de producir de manera que los ejes de las dos ramas de la probeta se mantengan en un plano. En el ensayo se puede exigir que las ramas de las probetas queden:

- Paralelas y a una distancia fijada de antemano (Fig. 4.1.a).
- Formando un cierto ángulo  $\alpha$  al emplear un mandril de diámetro determinado (Fig. 4.1.b).
- En contacto (Fig. 4.1.c).

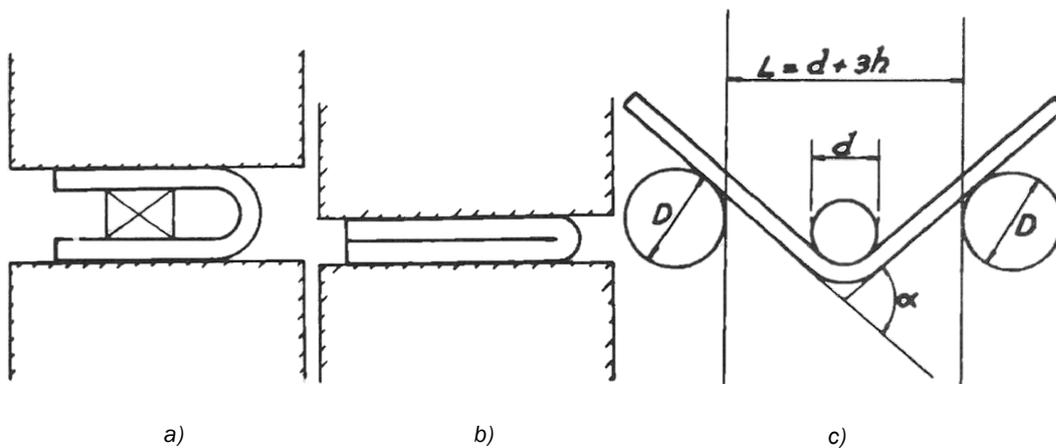


Fig. 4.1. Metodologías del ensayo de doblado

### 4.1.3.- ENSAYO DE DUREZA

El ensayo Vickers utiliza penetrador de diamante con forma de pirámide cuadrangular. Con ella consigue una mejor penetración a la vez que, por la mayor dureza del diamante, la posibilidad de medir materiales más duros que con otros ensayos como el Brinell. La pirámide se construye de modo que sus caras opuestas formen un ángulo de  $136^\circ$ . Como ese ángulo es bastante obtuso la profundidad de la huella es pequeña. Se aplicará la carga lentamente, elevando su valor gradualmente mientras penetra la pirámide sobre el metal. El tiempo de actuación de la carga oscila entre 15 y 30 segundos. El valor de la dureza de Vickers se define como:

$$HV = \frac{1.8544 * P}{l^2} \left( \frac{Kp}{mm^2} \right)$$

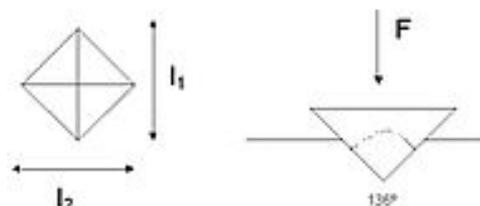


Fig. 4.2. Penetrador Vickers



Como valor de  $l$  se toma la media de las diagonales  $l = \frac{l_1+l_2}{2}$ . Las cifras de dureza son independientes de las cargas.

El ensayo Vickers es el más utilizado, tanto a nivel industrial como experimental. Esto se debe a que ofrece los datos más precisos y para la mayor variedad posible de metales.

El ensayo Brinell se caracteriza porque la impresión en el material se produce mediante una bola de acero extraduro o, en casos especiales, de carburo de wolframio. Se aplica una carga "p" y se presiona la esfera (diámetro D) sobre la superficie metálica cuya dureza se pretende medir, dejará allí una huella en forma de casquete esférico de diámetro "d" y superficie "s". Con los datos obtenidos de la huella se saca la dureza del material. Este ensayo no es adecuado para materiales muy duros ya que se produce deformación en el penetrador y los resultados no son fiables. Sin embargo, el acero a ensayar es válido.

#### 4.1.4.- ENSAYO DE RESILIENCIA

El ensayo consiste en romper mediante un solo golpe con un péndulo una probeta entallada. Se valora mediante la resiliencia que es la relación  $\rho = \frac{\tau}{s_u}$  entre el trabajo  $\tau$  absorbido en la rotura (en J) y la sección  $S_0$  de rotura (en m<sup>2</sup>).

El hecho de realizar el ensayo de flexión por choque sobre la probeta con entalla se funda en que se obtiene una concentración máxima de tensiones en sus proximidades que originan triaxialidad. La entalla en la probeta supone una mayor exigencia al material siendo indispensable allí donde, además de tenacidad, se requiere una elevada resistencia a la rotura frágil.

#### MÉTODO CHARPY

Este método utiliza un martillo como péndulo, colocando la probeta horizontalmente. Se sitúa el martillo a una cierta altura sobre el nivel de la probeta. Si se deja bruscamente en libertad, para que oscile en un plano vertical, chocará contra la probeta en su punto medio y sobre la superficie opuesta a la entalla, precisamente cuando se halle en su posición más baja. Esa posición se tomará como referencia para medir las alturas. Como parte



de la energía se ha invertido en la rotura de la probeta, el martillo continúa su marcha hasta pararse a una altura determinada.

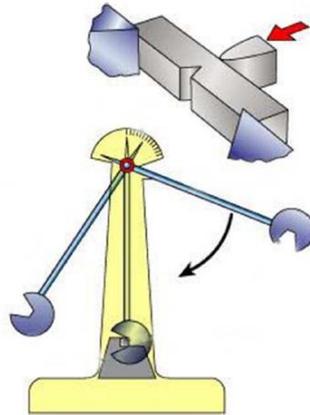


Fig. 4.3. Colocación de la probeta en el método Charpy

El valor de la resiliencia vendrá determinado por una ecuación que relaciona el peso del martillo, su longitud y la diferencia de alturas.

#### 4.1.5.- ENSAYO DE MICRODUREZA

El ensayo de microdureza suele estar destinado a piezas cuyo tamaño y espesor no son lo suficientemente grandes como para poder soportar las cargas aplicadas en macrodureza. En este caso será la medición de microdureza de una sección transversal de la unión soldada.

Para la realización de este ensayo se requieren aparatos que actúen con pequeños pesos. Lo más común es utilizar una variante del ensayo Vickers con un penetrador piramidal con un ángulo de  $136^\circ$  o con el diamante Knoop, que es el más idóneo en estos casos.

El tamaño de la diagonal en estos casos es del orden de 5 micras y la fórmula utilizada para determinar la microdureza es:

$$H_{Knoop} = \frac{P}{0.07028l^2}$$

Donde “P” es la carga en kilopondios y “l” la longitud de la diagonal mayor en mm.

#### LÍNEAS DE MICRODUREZA

Las líneas de microdureza son mediciones que indican la variación de la dureza de la unión soldada en función de su posición respecto al eje de simetría de la misma. Para su realización se hacen mediciones de dureza a lo



largo de diferentes posiciones, equiespaciadas, del cordón de soldadura, ZAT y metal base.

Con este ensayo se obtiene información sobre los cambios microestructurales en la unión soldada y del efecto que causa la variación térmica sobre la misma debida a la energía aplicada durante el proceso de soldeo.

## **4.2.- ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS APLICADOS EN LAS UNIONES SOLDADAS**

Los ensayos no destructivos (END) son de vital importancia dentro del control de calidad ya que son capaces de denotar la validez, o no, de una pieza sin provocar en ella daño alguno. Existen gran cantidad de ensayos no destructivos entre los que destacan la inspección visual, inspección por líquidos penetrantes, inspección por partículas magnéticas, inspección radiológica e inspección por ultrasonidos.

Para la realización de este estudio se utilizarán la inspección visual, los líquidos penetrantes y la inspección ultrasonidos. Los dos primeros debido a que son ensayos rápidos y que pueden dar datos fiables sobre el estado superficial del cordón y los ultrasonidos ya que son la forma más precisa de detectar cualquier tipo de defecto interno en la unión soldada.

A continuación, se realizará una descripción de los ensayos en su orden lógico de aplicación.

### **4.2.1.- INSPECCIÓN VISUAL**

La inspección visual, por su sencillez, facilidad de aplicación, rapidez de ejecución y economía es, sin género de dudas, el ensayo no destructivo, END, más usado y, aunque parezca una tarea simple, puede resultar de gran alcance si se ejecuta correctamente.

Aplicada conscientemente por personal con experiencia, la inspección visual identifica materiales que no cumplen con las especificaciones, facilita la corrección de defectos durante el proceso de fabricación evitando, de esta manera, su rechazo final y, en cualquier caso, reduce la necesidad de otros ensayos no destructivos.

#### **4.2.1.1.- DESARROLLO DE LA INSPECCIÓN**

El inspector visual empieza su trabajo recepcionando y examinando los metales base a unir. En función de las especificaciones debe asegurarse que



aquellos son correctos en cuanto a calidad, y dimensiones. A continuación, observa en las superficies accesibles dichos materiales a fin de detectar cualquier discontinuidad que pueda afectar a la posterior soldadura.

Una vez posicionadas las piezas a unir, comprobará la preparación de bordes para asegurarse que están de acuerdo con el diseño de junta. También debe vigilar la calidad del acabado, alineaciones y limpieza requeridas.

Durante la ejecución de la soldadura, el inspector revisará la zona donde se lleva a cabo, comprobando que los soldadores están previa y debidamente certificados y que se aplica correctamente el *procedimiento homologado*. Observará el depósito de los cordones, prestando una especial atención a la pasada de raíz, más susceptible de fisurarse que las de relleno. Se asegurará que se están utilizando los materiales de aporte idóneos, los parámetros de soldeo especificados y los gases de protección requeridos.

Al finalizar la soldadura, el inspector examina la unión para verificar que cumple lo requerido en cuanto a aspecto y requisitos de calidad. Tratará de detectar posibles imperfecciones, tales como mordeduras, salpicaduras, grietas, rugosidades y material de aporte en exceso o en defecto.

En los aceros de muy alto límite elástico y en los templados y revenidos, tanto la inspección visual como cualquier otra deben posponerse hasta pasadas 48 horas desde que se finalizó la soldadura, pues son aceros propensos a la fisuración en frío.

#### **4.2.1.2.- ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN**

Estudiando la superficie de la soldadura, puede conocer si el trabajo se ejecutó de forma correcta, ya que cuando se suelda con los parámetros adecuados la soldadura adquiere un contorno regular, con aguas y penetración uniformes. El inspector debe conocer cómo cambia el aspecto del cordón de soldadura en función de las variaciones que experimenta la longitud de arco y la intensidad.

Los inspectores examinan y estudian discontinuidades visibles para evaluar sus características en función de los códigos aplicables al trabajo. Las grietas no se admiten en ningún caso. Otros defectos requieren reparación, en función de su forma y dimensiones.

#### **4.2.1.3.- INSTRUMENTOS NECESARIOS**

Para facilitar la inspección visual, y llevarla a cabo en las mejores condiciones, se necesitan ciertos instrumentos como herramientas de trabajo.

Como instrumentos se utilizan galgas, cintas métricas, reglas que permitan la medición de espesores, aberturas y la detección de desalineaciones o excesos de abertura. A la hora de comprobar temperaturas se utilizarán termómetros. El empleo de lupas de 5 y 10 aumentos puede ser útil para detectar grietas y fisuras.

El endoscopio permite examinar zonas inaccesibles y completar otros métodos de END. Estos elementos suelen disponer en uno de sus extremos objetivos para primeros planos y de oculares en el otro extremo. Pueden ser flexibles o rígidos.

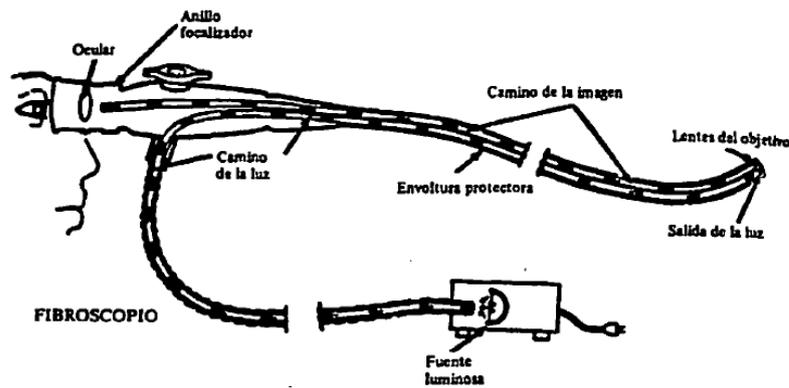


Fig. 4.4. Fibroscopio.



Fig. 4.5. Endoscopios comerciales

Los endoscopios serán muy importantes dentro de este estudio ya que, al tratarse de virolas, cuando se realicen los últimos cordones que den forma a la pieza. Esto es así ya que se han de inspeccionar las pasadas de raíz, cuya cara estará en el interior de la virola, lo que no permite el uso de otros instrumentos.



#### 4.2.2.- INSPECCIÓN POR LÍQUIDOS PENETRANTES

La inspección por líquidos penetrantes es un ensayo no destructivo mediante el cual es posible detectar discontinuidades que afloran a la superficie de sólidos no porosos. Se utiliza un líquido que, aplicado sobre la pieza a examinar como se observa en la secuencia de la figura 4.6., penetra por capilaridad en las discontinuidades y una vez eliminado el exceso, el retenido en el interior de las mismas exuda y, con la ayuda del revelador, puede ser observado en la superficie de la pieza.

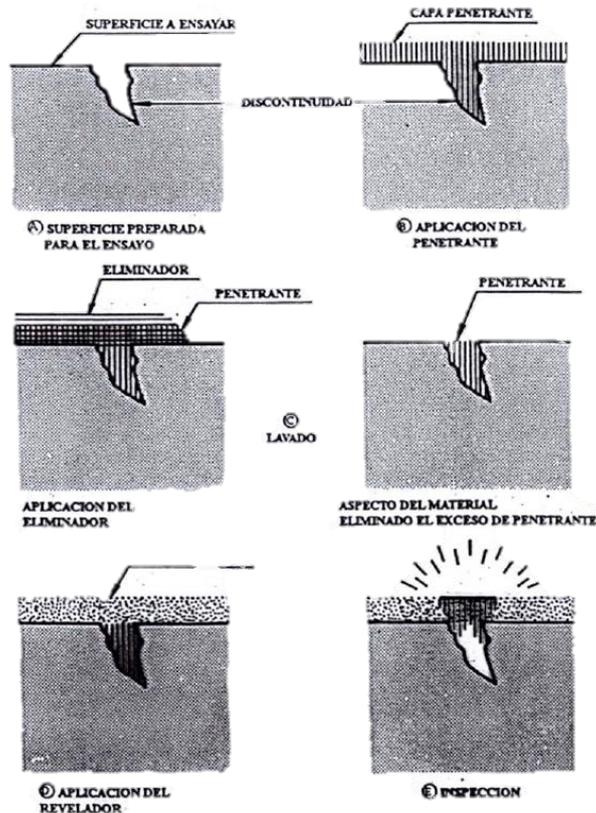


Fig. 4.6. Etapas básicas de la inspección por líquidos penetrantes

Se clasifica, en función del tipo de líquido penetrante, en:

- Ensayo con penetrantes fluorescentes.
- Ensayo con penetrantes coloreados.

Los primeros incorporan pigmentos que permiten que el líquido emita una fluorescencia muy intensa cuando se le ilumina con lámpara de luz ultravioleta. Se puede observar un ejemplo en la figura 4.7.

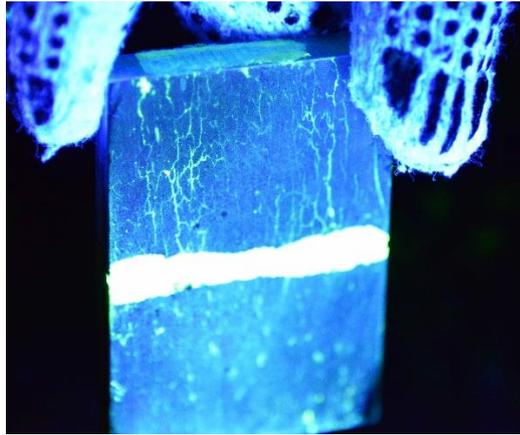


Fig. 4.7. Ensayo con penetrantes fluorescentes.

Los penetrantes coloreados incorporan pigmentos de color rojo brillante, que producen muy buen contraste con el color blanco del revelador como se puede ver en la siguiente figura.



Fig. 4.8. Ensayo con penetrantes coloreados.

#### 4.2.2.1.- DESARROLLO DE LA INSPECCIÓN

El ensayo se desarrolla en una serie de etapas que varían ligeramente en función del tipo de penetrante, su eliminación o tipo de revelador, como se desarrollará a continuación.

La primera de ellas es la preparación de la superficie. Es importante conseguir que las discontinuidades que afloran a la superficie y que puedan permanecer ocultas por óxidos, cascarilla, escoria, grasa, aceite, pintura, etc. queden libres de estos obstáculos. Se aplicarán agentes de limpieza que sean inocuos para el ensayo. Tras la limpieza la superficie debe quedar libre de restos de productos limpiadores.

En segundo lugar, se aplica el penetrante. Se puede realizar mediante un pulverizador o una brocha. El más utilizado es el spray. Tras su aplicación



se han de esperar unos minutos para que penetre en las discontinuidades. El tiempo de penetración suele ser recomendado por el fabricante.

Tras la espera se ha de eliminar el exceso de penetrante. El lavado no ha de ser excesivo ya que se puede eliminar parte del líquido alojado en las discontinuidades y tampoco insuficiente ya que aparecerán revelaciones falsas.

Seguidamente se aplica el revelador sobre la superficie. Este permite que afloren a la superficie los restos de penetrador alojados en las diferentes discontinuidades y con ello su percepción. Este afloramiento no es instantáneo y se han de esperar entre 10 y 30 minutos.

Por último, se realizará un análisis de la información y la limpieza final de la pieza.

#### **4.2.2.2.- ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN**

Se realizarán durante el tiempo de revelado y consiste en determinar si las indicaciones observadas son reales y se corresponden a discontinuidades o si son falsas y se deben a causas no relacionadas con los defectos.

Una vez se determina que la indicación es real se ha de determinar si esa discontinuidad es aceptable o se ha de rechazar. Los criterios de aceptación y rechazo se definen previamente en el procedimiento escrito de soldadura.

Si se emplean penetrantes fluorescentes, la interpretación y evaluación se realizarán bajo luz ultravioleta. Además, estas operaciones se realizarán en áreas o zonas oscuras. Si se utilizan penetrantes coloreados la interpretación y evaluación se efectuarán bajo una iluminación blanca.

Una buena práctica para comprobar si la indicación es falsa consiste en eliminarla y repetir el proceso por completo. Si la indicación vuelve a aparecer se trata, probablemente, de una discontinuidad.

#### **4.2.3.INSPECCIÓN POR PARTÍCULAS MAGNÉTICAS**

La inspección por partículas magnéticas es uno de los ensayos que no se van a realizar para la realización de este proyecto. Se trata de un ensayo no destructivo que en materiales ferromagnéticos permite detectar grietas y otras discontinuidades, tanto superficiales como próximas a la superficie. La sensibilidad es máxima en las discontinuidades superficiales y disminuye rápidamente a medida que aumenta la profundidad, de tal forma que es prácticamente imposible detectar discontinuidades que se encuentran a más de cinco milímetros bajo la superficie.



Este END, aplicado sobre uniones soldadas con aguas marcadas en el cordón, resulta poco adecuado, por el efecto retenedor que aparece.

El ensayo se basa en el siguiente fenómeno físico. Si a una pieza de acero al carbono se la somete a la acción de un campo magnético, cuyas líneas de fuerza están orientadas según se indica en la figura 4.9. y existe una discontinuidad en su superficie cuyo plano sea perpendicular a las mismas, las líneas de fuerza tenderán a salvar dicho plano como si se tratara de un obstáculo, ya que tendrá una permeabilidad menor que el acero. Ello se traduce en una distorsión de las líneas de fuerza, donde observamos cómo las más próximas a la superficie se ven obligadas a salir al exterior formando un campo de fuga. La distorsión del campo eleva la energía del sistema, que resulta más inestable que si no existiese la discontinuidad.

Si, en estas circunstancias, se extienden sobre la superficie de la pieza partículas finas de material ferromagnético, tenderán a acumularse en los campos de fuga para facilitar el paso de las líneas de fuerza. Si el plano de la discontinuidad es paralelo a las líneas de fuerza o no hay distorsión del campo la discontinuidad es inapreciable.

Las partículas actúan como detectoras del campo de fuga y forman una imagen sobre la superficie de la pieza que se corresponde con la imagen superficial de la discontinuidad.

#### **4.2.4.- INSPECCIÓN POR ULTRASONIDOS**

El examen por ultrasonidos es un ensayo no destructivo que utiliza la propagación para la detección de discontinuidades en diferentes tipos de materiales. Su mayor ventaja es la capacidad de detectar discontinuidades internas accediendo únicamente a un lado de la pieza.

El objetivo de este ensayo es asegurar la validez de un producto a partir de la información sobre sus discontinuidades internas revelando, si existen, la naturaleza de las mismas y sin perjuicio de su utilidad. Se trata de un ensayo de gran complejidad y solo realizable por técnicos con un elevado nivel de formación. Por ello solo se explicarán los conceptos principales del ensayo.

##### **4.2.4.1.- GENERACIÓN Y RECEPCIÓN DE ONDAS ULTRASÓNICAS**

Un ultrasonido es una onda mecánica, y como tal, se origina por la oscilación de las partículas a través del medio de propagación. Cualquier cuerpo tiene sus partículas en equilibrio y solo se moverán cuando una fuerza exterior lo rompa. Al aplicar la fuerza las partículas superficiales comunicarán la energía a sus vecinas y así sucesivamente produciéndose una propagación



de la onda. Esa onda se propagará a determinada frecuencia. La frecuencia es el número de oscilaciones de la partícula por unidad de tiempo. Su intensidad irá disminuyendo según avance.

Existirán dos tipos principales de onda, longitudinales y transversales. Se diferenciarán en la dirección de las oscilaciones.

#### ***4.2.4.2.- INTERFERENCIAS DE LAS ONDAS ULTRASÓNICAS EN LOS MATERIALES***

La energía sonora se dispersa a medida que el haz avanza a través de la pieza a ensayar y la intensidad disminuye, por una parte, con la distancia del palpador y por otra, al eje del haz. La intensidad en el campo próximo varía irregularmente debido a la interacción de la onda sonora cerca del palpador. Eso hace poco viable la detección de discontinuidades próximas a la superficie. En un campo lejano la intensidad disminuye debido a la atenuación como a la divergencia del haz.

La falta de homogeneidad de los materiales provoca diferencias de impedancia que dispersan las ondas ultrasónicas actuando como pequeños reflectores. Por este motivo es mucho más sencillo analizar un metal con estructura de grano fino que de grano grueso.

Otro factor es la absorción del haz. Se puede definir como la conversión de energía ultrasónica en calor. La absorción es proporcional a la frecuencia por lo que a mayor frecuencia mayor atenuación.

#### ***4.2.4.3.- GENERACIÓN DE ONDAS. EFECTO PIEZOELÉCTRICO***

El elemento generador-receptor de ondas puede ser un material piezoeléctrico. Estos tienen la propiedad de deformarse al recibir una presión mecánica y generar una diferencia de potencial eléctrico entre sus caras y a la inversa, al aplicar una diferencia de potencial cambiar de tamaño produciendo una onda de presión. El material más utilizado es el titanato de bario.

Para transmitir las ondas desde el cristal al material a inspeccionar se utiliza un acoplante acústico. Esta es una sustancia que permite la transmisión de las oscilaciones producidas por el cristal. Su principal misión es eliminar el aire. Se suelen utilizar geles o aceites que varían en función de la pieza.

El elemento emisor de la onda ultrasónica se llama **palpador**. Para efectuar las inspecciones existen diferentes tipos que se adaptan al tipo de control a efectuar.



Las principales características del palpador son su sensibilidad y su poder resolutivo. Será más sensible cuanto más pequeñas sean las discontinuidades que es capaz de detectar. El poder resolutivo se traduce en la capacidad del palpador para diferenciar indicaciones próximas entre sí o para separar ecos de fondo, cercanos el uno del otro, de dos espesores distintos.

Existen dos tipos de palpadores. Palpadores normales que utilizan ondas longitudinales perpendiculares al defecto y los palpadores angulares que emiten ondas con un cierto ángulo.

#### 4.2.4.4.- PALPADORES ANGULARES

Son los más utilizados para la inspección de uniones soldadas. Normalmente no se suele eliminar el sobreespesor de los cordones de soldadura. Esto implica que no se pueden utilizar palpadores longitudinales ya que no se consigue un buen acople sobre la superficie del cordón. Además, muchas veces los defectos inherentes a las soldaduras son de orientación inclinada como podemos observar en la figura 4.10., por lo que no son buenos reflectores para ser detectados mediante ondas longitudinales emitidas por un palpador normal. Sin embargo, las ondas transversales, emitidas por un palpador angular, recorren la unión en zig-zag y pueden detectar cualquier defecto inclinado presente en el cordón.

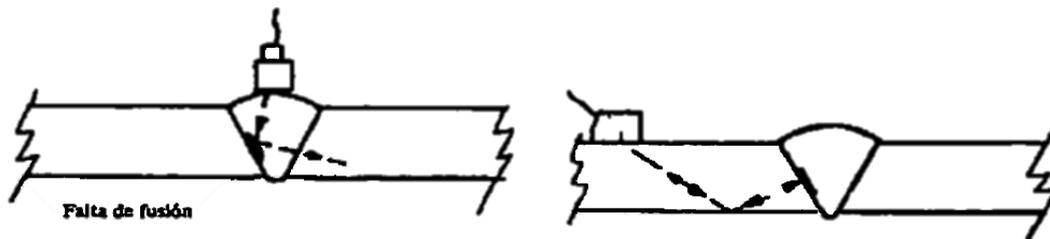


Fig. 4.9. Comparación entre palpador normal y angular

Los palpadores angulares llevan un ángulo marcado en su carcasa que se refiere al ángulo de refracción de las ondas transversales. Los más comunes son  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $70^\circ$ .

Además del ángulo del propio palpador también se ha de tener en cuenta el material del conjunto. Esto es así debido a que según el material a inspeccionar varía la velocidad de propagación de las ondas transversales.

#### 4.2.4.5.- REALIZACIÓN DEL ENSAYO

Antes de realizar el ensayo sobre el cordón de soldadura se ha de conocer el tipo de material a examinar, el espesor de la chapa, el diseño de la



joint, the welding process used and whether the weld has been thermally treated.

There are two main methods:

### Method of Transparency

It is based on the shadow effect that a discontinuity produces when illuminated by an ultrasonic beam. It requires two transducers, one emitter and one receiver of the signal. In the presence of a defect, the intensity of the wave at the receiver decreases due to partial reflection or becomes zero if the reflection is total. It is independent of the use of continuous waves or pulses for the test because the emitter and the receiver are separated from each other. In this test, it is not possible to determine the depth at which the defect is located in the piece. Its major inconvenience is the need to access both faces of the piece. Additionally, an exact alignment between emitter and receiver is necessary.

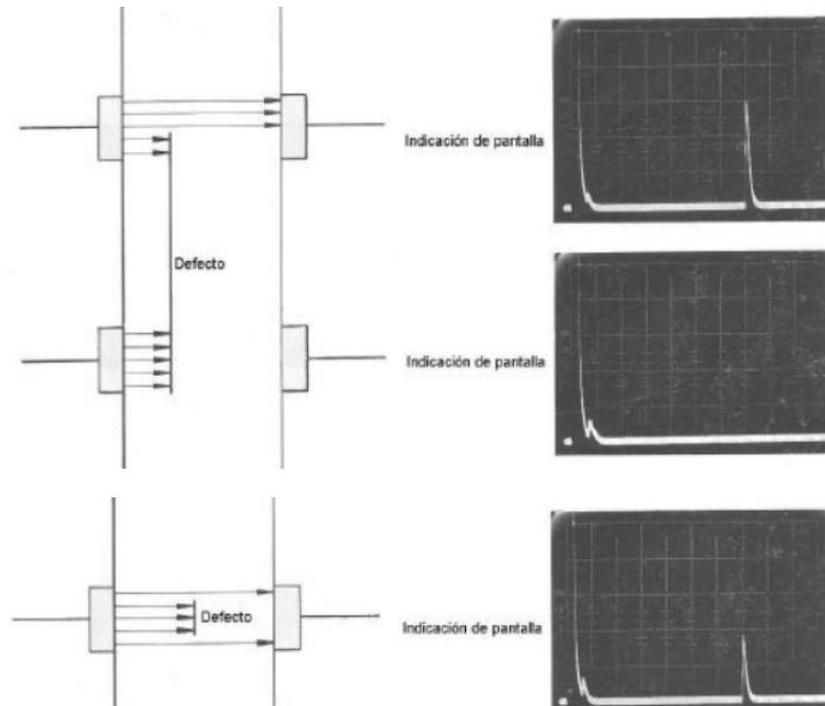


Fig. 4.10. Método de transparencia de ultrasonidos

### Method Pulse-echo

Operates by reflection. It is based on the echo effect that a reflector produces when illuminated by an ultrasonic beam. A wave is emitted through the material, and the reflected wave is measured for acoustic intensity and travel time. Therefore, the piezoelectric head acts as emitter-receiver and will be of the micro-transducer type. As the intensity of the received wave



es mucho más débil que la emitida no puede operarse con ondas continuas. Por ello se emplean exclusivamente impulsos.

El fundamento teórico es el mismo desarrollado donde se aplica un impulso eléctrico sobre el palpador y este genera una onda ultrasónica, e inmediatamente después, mientras aún se está propagando la onda el mismo oscilador está listo para la recepción. La onda penetra el material hasta que, como resultado de una superficie límite, tiene lugar una reflexión total o parcial. Si la superficie reflectante se encuentra perpendicular a la dirección de propagación de la onda, esta se refleja en su dirección primitiva y, al cabo de un tiempo llega de vuelta al oscilador siendo reconvertida en un impulso eléctrico. Pero no toda la energía que regresa es reconvertida, sino que en la interfaz entre el cabezal y la superficie de la pieza tiene lugar una nueva reflexión, por lo que una parte menor del sonido vuelve a atravesar la pieza por segunda vez y así sucesivamente.

Puesto que se puede medir el tiempo de recorrido y se conoce la velocidad del sonido en el medio ensayado este método permite establecer la distancia que existe entre el cabezal y las superficies reflectantes, sean estas superficies de la pieza o discontinuidades internas. Otra ventaja es que solo se necesita acceder a una superficie y el acoplamiento es más sencillo.

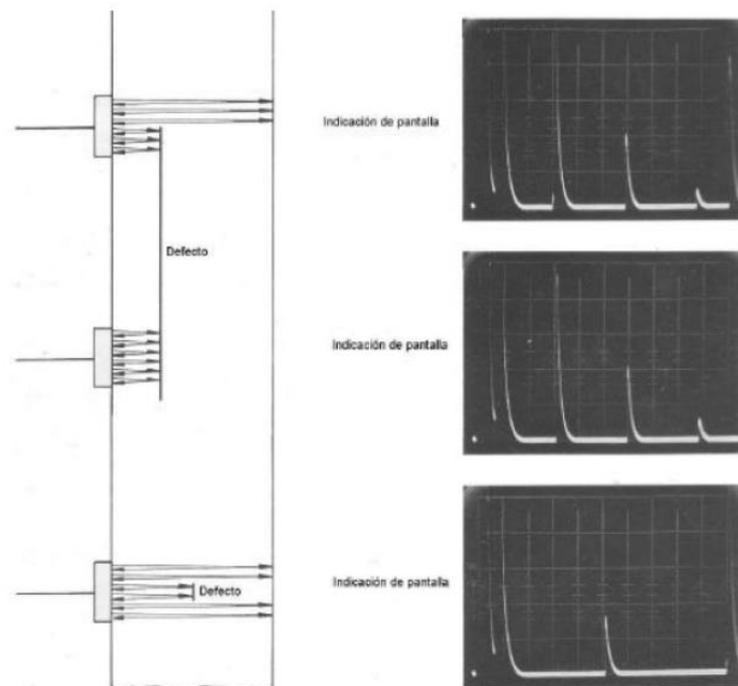


Fig. 4.11. Método impulso-eco

#### 4.2.5.- INSPECCIÓN RADIOLÓGICA

La radiología se trata de otro de los ensayos que no se van a utilizar. Esta estudia la forma de obtener e interpretar la imagen fotográfica producida al incidir rayos X o  $\gamma$  sobre una placa sensible, después de haber atravesado



una unión soldada. La finalidad del ensayo es conseguir una imagen nítida y estable de los defectos que puedan existir en la unión soldada.

Dentro de los END goza de gran aceptación ya que es el único que proporciona un documento real de la inspección, la placa radiográfica.

El método se basa en la irradiación de piezas con rayos X o  $\gamma$ . Estas son radiaciones electromagnéticas, al igual que la luz, pero de menor longitud de onda y por tanto de mayor energía. A la hora de realizar el ensayo la principal diferencia entre ambos es la del contraste de la imagen obtenida, que es mejor en los rayos X. Esto se debe a que los rayos X ofrecen un espectro continuo de frecuencias y cuando se encuentran un cambio localizado de absorción, como el que representa la porosidad o las grietas, son absorbidos selectivamente en función de la energía. Para los rayos  $\gamma$  esta absorción se convierte en una cuestión de “pasa o no pasa”.

La fuente de rayos X requiere de un suministro externo de energía por lo que su utilización más frecuente es en el taller. Sin embargo, la fuente de rayos  $\gamma$  no lo necesita, por lo que goza de mayor autonomía y es idónea para su empleo en obra. Esto se debe a que se tratan de pequeñas cantidades de isótopos radioactivos que emiten radiación por sí solos. Los isótopos más comunes son el Iridio 192, el Cesio 137 y el Cobalto 60.

La radiación al atravesar la pieza emerge de dos formas diferentes, la radiación pasante o primaria y la radiación secundaria.

- Radiación primaria: sigue una trayectoria recta desde la fuente hasta la placa radiográfica sin haber sido absorbida ni desviada.
- Radiación secundaria: es la que, en caso de no ser absorbida, es desviada al atravesar la soldadura y produce sobre la placa una especie de velo que reduce la definición de la imagen.

La película radiográfica, similar a las utilizadas en fotografía, consiste en una emulsión de haluro de plata en gelatina, extendida por las dos caras de una hoja transparente de acetato de celulosa. El haluro de plata es un material sensible que queda afectado por la radiación y que durante el revelado posterior se descompone en plata metálica, que se ennegrece. Esto nos da la imagen deseada.

### 4.3.- METALOGRAFÍA

La metalografía se encarga del estudio de las características estructurales de un metal y las relaciona con sus propiedades físicas, químicas y mecánicas. Está basada en las observaciones visuales tanto a escala microscópica como macroscópica. Es una técnica que se podría



catalogar como destructiva ya que se efectúa sobre muestras del cordón de soldadura.

Mediante la observación macroscópica es posible observar los detalles más groseros de la estructura como su homogeneidad. Está más enfocada al control de calidad ya que se pueden observar detalles sin necesidad de obtener muestras.

Mediante el análisis microscópico es posible definir:

- El tamaño y morfología de grano.
- La forma y distribución de las fases de una aleación.
- Cantidad, morfología y distribución de las inclusiones no metálicas.
- Presencia de heterogeneidades y segregaciones que modifican las propiedades mecánicas.

Se trata de un ensayo especialmente indicado para la validación ya que es necesaria la extracción de muestras y con ello la destrucción de la pieza.

Por tanto, a través de la microestructura se podrá deducir el comportamiento general de la unión soldada para un fin determinado. Además, aportará información sobre los tratamientos térmicos y mecánicos que haya experimentado el material.

Las tomas de muestras más frecuentes se ejecutan perpendicularmente a la línea de soldadura ya que representa toda la porción de la misma pero también se pueden tomar muestras en otras direcciones:

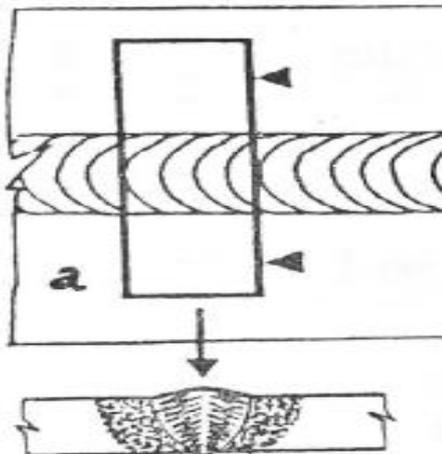


Fig. 4.12. Corte transversal

Es muy importante que la técnica de extracción de la muestra no provoque un calentamiento susceptible de modificar el aspecto macro y micrográfico de la misma. La principal diferencia de preparación entre la técnica macrográfica y la micrográfica es el grado de pulido realizado y la intensidad del ataque necesario.



### 4.3.1.- MACROGRAFÍA

El ataque químico de una probeta macrográfica hace aparecer las zonas constitutivas de la soldadura, que se manifiestan por intensidades de ataque o coloraciones diferentes. Estas diferencias se deben a las variaciones compositivas y estructurales inducidas durante el soldeo. Se deberán distinguir cuatro zonas principales:

- **Zona de metal fundido:** en ella ha reinado el estado líquido durante la ejecución de la soldadura. Si la soldadura es bruta de ejecución los granos resultantes tendrán una estructura bruta de colada y será visibles sin aumentos.
- **Zona de unión:** se corresponde con el límite de la ZAT y la ZMF. Se pone en evidencia por la diferencia de estructuras entre una parte y otra. Esta zona es de gran interés por ser la zona de inicio de solidificación del metal fundido.
- **Zona afectada térmicamente:** zona en la que el ciclo térmico provoca modificaciones estructurales en estado sólido. Cada transformación está caracterizada por una temperatura mínima. El límite exterior de la ZAT coincidirá con la isoterma característica de esa temperatura. Será más o menos apreciable si el proceso es más o menos progresivo.
- **Metal base:** es importante incluir esta zona en el examen metalográfico, aunque no haya sufrido transformaciones. Esto se debe a que el metal base sirve como referencia para la apreciación de las transformaciones. Además, es posible la existencia de ciertas modificaciones que no se aprecian a nivel macroscópico y si esa zona es eliminada se podría perder información.

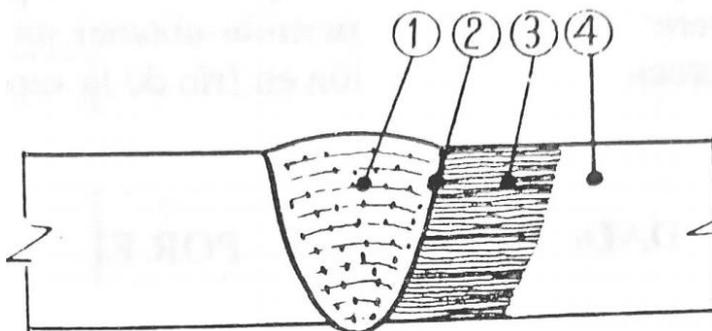


Fig. 4.13. Zonas constructivas de una unión soldada:

1. ZMF
2. Borde de unión
3. ZAT
4. Metal base

Los principales defectos geométricos observables son:

- Desnivelación de bordes.
- Deformación angular (efecto techo).
- Desfase de los cordones de cara y raíz.
- Mordeduras
- Sobreepesores excesivos, o la falta de metal.
- Faltas de fusión (defectos de penetración).



Y como defectos físicos o de homogeneidad:

- Sopladuras.
- Inclusiones no metálicas (escoria).
- Faltas de unión (pegaduras).
- Fisuras.

Las condiciones de ejecución de las soldaduras pueden ser precisadas por el examen macrográfico. Por ejemplo:

- **Determinación del procedimiento de soldadura:** es identificable, esencialmente, por el perfil de la zona fundida sobre cortes transversales y por la extensión de la ZAT.
- **Número, disposición y orden de las pasadas**
  - + En el seno del metal fundido, las zonas de unión son manifiestas y presentan su concavidad del lado que han sido ejecutadas las pasadas. Por los recubrimientos de las pasadas se distingue su orden y su número.
  - + Las ZMF de una pasada, térmicamente afectadas por las otras pasadas, aparecen por su concavidad y su estructura diferente.
  - + Los límites de las ZAT del metal base, que proceden de cada pasada, confirman, por su orientación y sus intersecciones el orden.
  - + El metal fundido de las pasadas brutas se distingue por su estructura no transformada por el efecto de pasadas posteriores.
  - + A pesar de esto pueden quedar dudas sobre el orden de ciertas pasadas como se muestra en la figura 4.15.

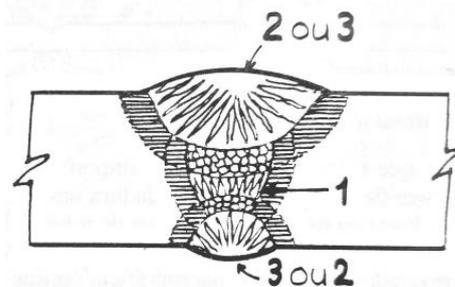


Fig. 4.15. Interpretación macrográfica del orden y disposición de las pasadas

También será apreciable la tasa de dilución y los tratamientos térmicos realizados sobre el cordón antes, durante o después de la soldadura.

El examen macrográfico siempre precede y guía al micrográfico, sea cual sea el objeto de este último. Este examen solo da fe de las particularidades que desembocan sobre el corte elegido. Sin embargo, es el mejor método de control de características de ejecución que se mantienen a lo largo del cordón.



### 4.3.2.- MICROGRAFÍA

Las técnicas metalográficas se han desarrollado para identificar las fases y microconstituyentes presentes en los metales y aleaciones y explicar los procesos de conformado y tratamiento que han experimentado, siendo igualmente responsables de sus propiedades y características. Generalmente esas fases y microconstituyentes son de tamaño microscópico y por eso es necesaria una preparación metalográfica. Para poder observar correctamente todo esto la superficie de observación debe ser perfectamente plana y estar pulida.

Una preparación defectuosa puede arrancar las inclusiones interesantes, destruir los bordes de la estructura y generar una estructura falsificada. La elección de la muestra es de vital importancia ya que esta ha de ser representativa de todo el material. La preparación constará de varias partes redactadas a continuación.

#### **Corte Metalográfico**

El primer paso consiste en separar las zonas a observar del resto de la unión. Si la sección es blanda se podrá utilizar una sierra manual. Si es de dureza media o alta se utilizan discos abrasivos.

#### **Empastillado**

El empastillado consiste en la creación de un soporte en el que se encuentra aprisionada la muestra. Se suele realizar con plásticos sintéticos ya que después de su montaje son relativamente duros y no atrapan partículas del esmeril.

#### **Desbaste**

Mediante el desbaste se pretende que la superficie a observar sea totalmente plana. Se suele llevar a cabo mediante desbastadoras manuales o mecánicas. El modo de proceder es pasar las probetas sobre lijas de diferente tamaño, cada vez más fino. La operación termina cuando la superficie queda totalmente plana y se han eliminado las irregularidades.



### **Pulido Mecánico**

El pulido tiene por objeto eliminar de su superficie las rayas finas producidas en la última operación de desbaste y conseguir una superficie especular que permita la reflexión de la luz.

El pulido tiene tres fases: el pulido preliminar, el intermedio y el pulido final. Las operaciones son análogas y consisten en utilizar un paño sobre el que se añade el abrasivo. El paño gira en la pulidora y se coloca la probeta sobre la misma. Según se avanza se añaden paños con pelo más largo y abrasivos de menor tamaño. El pulido final deja la superficie pulida uniformemente y libre de rayas.

### **Ataque**

Este permite mostrar los constituyentes del metal o aleación. El ataque se logra mediante la acción de un reactivo químico adecuado bajo condiciones controladas. Cuando se aplica un reactivo a la superficie, los detalles estructurales se manifiestan por una disolución selectiva de la superficie.

### **Observación Metalográfica**

El microscopio metalográfico se compone de dos partes básicas: objetivo y ocular. Su finalidad es la de hacer posible la observación de detalles de la probeta que son demasiado pequeños como para poder ser apreciados a simple vista.



Elaboración del Procedimiento Escrito de Ejecución y  
Control de Calidad de una Unión Soldada de  
Virolas de Acero





# CAPÍTULO V. DISEÑO DE LA UNIÓN SOLDADA

## 5.1.- DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO

La empresa que ha de realizar el procedimiento escrito de soldadura es una calderería de tipo medio. Esta recibe el encargo de realizar un depósito de acero soldando las virolas y las tapas, además del sistema de soporte y anclaje y accesorios de alimentación, salida y control.

La calderería recibe el material de la empresa que encarga la creación del depósito. Este es suministrado en forma de chapas de 10 mm de espesor laminadas en caliente. Se trata de un acero al carbono AISI 1045.

El diseño previo del depósito ha sido proporcionado por el cliente y la calderería solo se encargará de la elaboración del procedimiento escrito de soldadura y su ejecución. Según las directrices del cliente las chapas deberán ser curvadas y soldadas para la realización del cuerpo del depósito. Además, se realizarán con ellas los “caps”. Estos se soldarán de igual modo al cuerpo. Y por último se realizarán el resto de elementos necesarios como soportes, conductos de entrada y salida de materia, válvulas reguladoras, etc.



*Fig. 5.1. Diseño virola*

Se trata de un depósito diseñado para el almacenamiento de colorante textil. El colorante está elaborado mediante pigmentos naturales que son inocuos y no producen ningún tipo de corrosión sobre el depósito. Además, el depósito estará situado en el interior de la nave, en un ambiente protegido. El



líquido se almacenará a baja presión por lo que los esfuerzos que tenga que soportar el depósito serán pequeños.

El depósito tiene 5 m de largo y 1.8 m de diámetro. El fondo es un fondo toriesférico del tipo Klopper. Las chapas de acero tienen un ancho de 1500 mm por lo que el cuerpo de la virola se compondrá de dos chapas de 1500 mm y una central de 1200 mm. Por tanto, la longitud de los fondos es de 400 mm cada uno. Todo esto se puede ver en el plano del diseño:

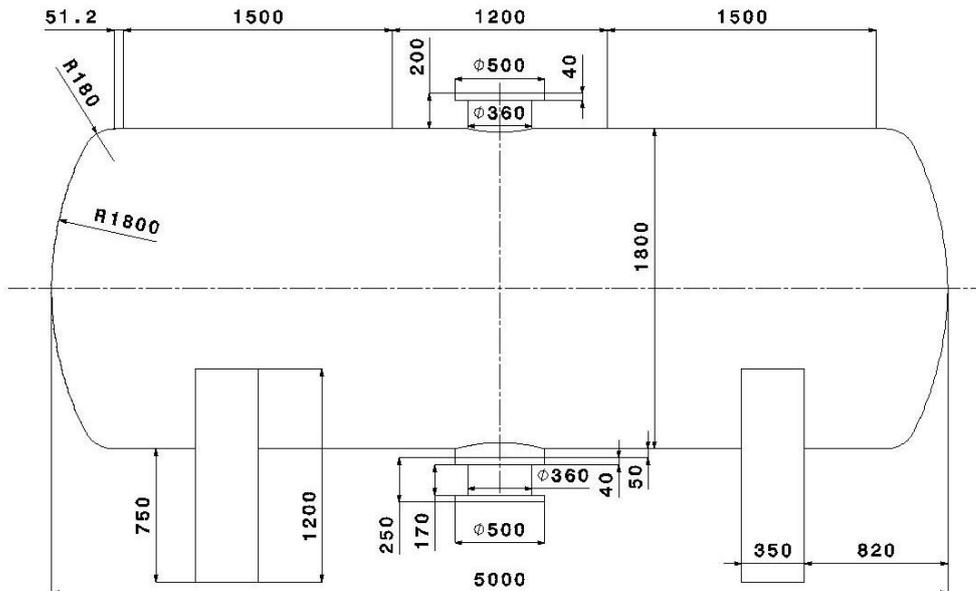


Fig. 5.2. Plano del depósito

El depósito tiene varios tipos de soldaduras diferentes que se ven en el siguiente plano:

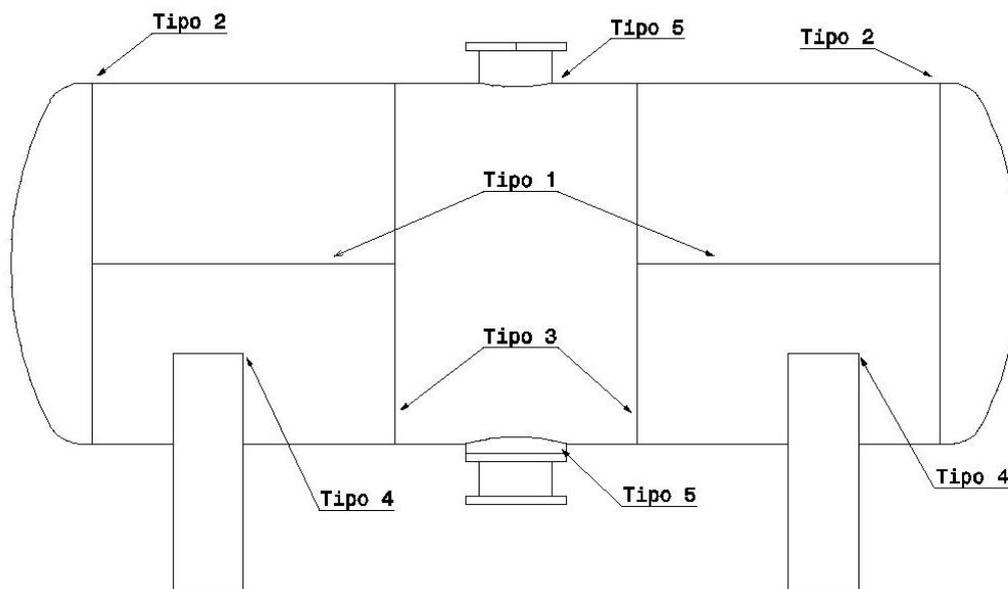


Fig. 5.3. Distribuciones de uniones soldadas del depósito



	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Categoría	A	B	A	D	D
Cantidad	3	2	2	2	1

La categoría de la unión, descrita en el artículo VIII del código ASME, viene determinada por la posición y el tipo de soldadura dentro de cada depósito.

Para la realización del procedimiento escrito de soldadura la chapa se corta en otras más pequeñas con las siguientes dimensiones. 300 mm de largo, 100 mm de ancho y 10 mm de espesor. Con estas muestras se realizarán los cupones de soldadura y se obtendrán las diferentes probetas con las que realizar los ensayos descritos en capítulos anteriores.

El departamento de ingeniería es el encargado de realizar el procedimiento escrito de soldadura. En este proyecto solo se realizará el procedimiento para una de las soldaduras que tiene el depósito. En concreto para la denominada **TIPO 1**. El diseño de la soldadura se realizará en base a la experiencia de los ingenieros de la empresa. Por ello los valores iniciales de las variables operativas se tomarán según su experiencia en casos similares y después se irán modificando hasta conseguir la unión deseada. Se trata de un proceso iterativo.

A continuación, se van a describir los procesos y variables inicialmente escogidas. Para su diseño se han seguido las indicaciones recogidas en la Sección VII del código ASME.

## 5.2.- ELECCIÓN DEL PROCESO

Dentro de la sección VIII del código ASME se especifican los siguientes procesos como válidos para la realización de soldaduras en recipientes a presión:

- Soldadura por arco manual con electrodos revestidos (SMAW).
- Soldadura por arco sumergido (SAW).
- Soldadura por arco bajo gas protector con electrodo consumible (GTAW) dividida en:
  - Metal Inert Gas (MIG).
  - Metal Active Gas (MAG).
- Soldadura por arco bajo gas protector que engloba:
  - Tungsten Inert Gas Welding (TIG).
  - Plasma Arc Welding (PAW).
- Soldadura por haz de electrones.



- Soldadura por electroescoria.
- Soldadura por resistencia.
- Soldadura termoquímica
  - Soldadura aluminotérmica.
  - Soldadura con gas oxidante.

Debido a su gran versatilidad y campos de aplicación, además de la mayor disponibilidad de equipamientos los procesos elegidos son los que se engloban dentro de los procesos de soldadura por arco.

Al tratarse de chapas de 10 mm de espesor el cordón de soldadura será un cordón multipasada. En el caso de cordones multipasada es recomendable el uso de varios procesos de soldadura para mejorar su calidad, aumentar su productividad y reducir los costes del proceso.

Como ya se ha comentado anteriormente, la primera pasada es la denominada pasada de raíz. Esta es de vital importancia ya que definirá la calidad del resto de la unión soldada. Para este tipo de cordones se suelen emplear dos tipos de proceso, soldadura TIG y soldadura con electrodo revestido SMAW. En este caso se ha elegido la soldadura TIG. Esto es debido a que este proceso produce los cordones de soldadura de mayor calidad. Además, es un proceso que tiene la posibilidad de ser autógeno o no. Las soldaduras autógenas ofrecen mejores garantías que las que utilizan material de aportación. En este caso, como primera medida, se intentará realizar la soldadura de manera autógena y de no ser posible se realizaría con aporte de material.

El resto de pasadas se denominan pasadas de relleno. Para este tipo de pasadas se recomiendan procesos con un elevado factor de marcha. Con ello se consiguen una mayor producción. Los procesos con mayor factor de marcha son la soldadura SAW y GTAW o semiautomática. La soldadura SAW es descartada por su equipamiento. Además, las soldaduras semiautomáticas ofrecen una gran calidad con un nivel de producción elevado. Dentro de ellas se opta por el proceso MAG ya que el material a soldar es un acero al carbono con contenido medio. Además, este tipo de equipamientos está altamente extendido dentro del mundo de la industria. El número de pasadas realizadas con el proceso MAG será el necesario hasta terminar por completo el cordón.

### 5.3.- LA JUNTA DE LA UNIÓN SOLDADA

Para las soldaduras del cuerpo de la virola, denominadas del tipo A dentro de la sección VIII del código ASME existen tres opciones:

- A tope con penetración por ambas caras.
- A tope por una cara con respaldo.
- A tope por una cara sin respaldo.



En este caso se ha elegido la opción de soldadura a tope por una cara sin respaldo. La posición de soldeo será la denominada 1G o posición de sobremesa.

Al ser chapa de 10 mm de espesor y realizarse la soldadura por una sola cara el diseño de la junta seleccionado es el denominado "junta en V". Con ello se intenta conseguir una buena penetración y calidad en el cordón. El diseño sería el siguiente:

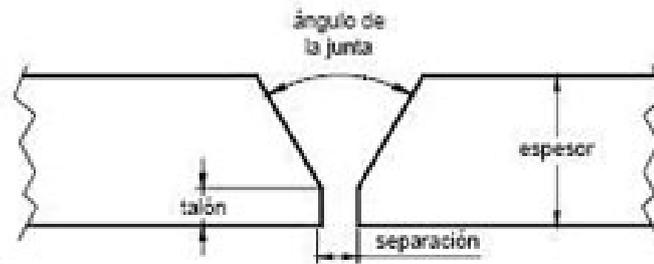


Fig. 5.4. Junta en V

Para el primer cupón los valores del diseño de la junta son los siguientes:

- Talón 2 mm.
- Separación de la junta 1.6 mm.
- Ángulo de la junta 70°.
- Ángulo inverso de las piezas para reducir la deformación 3°
- Punteado por la cara de respaldo cada 75 mm.

## 5.4.- VARIABLES OPERATIVAS

Como se ha comentado anteriormente el proceso elegido para realizar la pasada de raíz es el proceso TIG. Según estas premisas y el equipamiento disponible se han seleccionado los siguientes parámetros para la realización del primer cupón:

- Electrodo:  $d=2.4$  mm al 2% de torio afilado a 15°.
- Tensión de vacío: 60 V corriente continua (DC).
- Tensión de soldadura: 16 V (DC).
- Polaridad directa
- Posición de la antorcha:  $\alpha=50^\circ$
- Intensidad fuente 1: 130 A (DC).
- Intensidad fuente 2: pulsada + 130 A.
- Frecuencia: 400Hz.
- Preflujo de gas: 2 s.
- Postflujo de gas: 6 s.
- Caudal de gas: 9 l/min.



Elaboración del Procedimiento Escrito de Ejecución y Control de Calidad de una Unión Soldada de Virolas de Acero



- Velocidad de avance: 100 mm/min.

El gas utilizado como protección durante este proceso es argón 100%.

Para las pasadas de relleno se utilizará un proceso MAG debido a su elevada productividad y buena calidad de las uniones. Los parámetros iniciales serán:

- Intensidad: 235 A (DC).
- Tensión de soldadura: 22.5 V (DC).
- Velocidad de avance: 250 mm/min.
- Velocidad de aporte del hilo: 3.6 m/min.
- Caudal de gas: 10 l/min.

El hilo utilizado será el ER 70S-6 según la normativa ASME. Será un acero al carbono con un contenido aproximado de 0.1% C, 1.6% Mn, 0.9% Si, 0.02% S, 0.01% P y 0.16% Cu. En este caso el hilo será macizo y con un diámetro de 1.2 mm.

En cuanto al gas de protección se utilizará una mezcla de varios gases. Esta mezcla se compone de un 85% de argón, un 13% de CO<sub>2</sub> y un 2% de O<sub>2</sub>.

Para el cálculo de la temperatura de precalentamiento se seguirá el método de Sèfèrian. Para ello primero es necesario calcular el carbono equivalente químico del material según su composición química.

$$[C]_q = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} (\%)$$
$$= 0.46 + \frac{0.72}{6} + \frac{0.17 + 0.06 + 0}{5} + \frac{0.16 + 0}{15} = 0.637\%$$

El carbono equivalente total es la suma del carbono equivalente químico y del equivalente en carbono del espesor. Se puede expresar de la siguiente manera en función del espesor en mm del material:

$$[C]_T = (C)_q * (1 + 0.005e) = 0.637 * (1 + 0.005 * 10) = 0.669\%$$

Y finalmente la expresión para determinar la temperatura de precalentamiento es:

$$T_p = 350 * \sqrt{[C]_T - 0.25} = 350 * \sqrt{0.669 - 0.25} = 226.55 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Por tanto, la temperatura de precalentamiento y entre pasadas es **T<sub>P</sub>=230 ± 10 °C**



## 5.5.- NIVEL DE CALIDAD Y CONTROL DE CALIDAD DE LA UNIÓN SOLDADA

En cuanto al nivel de calidad y el control de calidad de la unión soldada se han seguido las recomendaciones del código ASME y se ha realizado una selección de los mejores END en función de variables como su versatilidad, grado de control o disponibilidad del equipo.

Según esto se ha decidido realizar como primer ensayo una inspección visual para controlar imperfecciones apreciables a simple vista. Seguidamente se realizará un ensayo con líquidos penetrantes. En este caso se ha optado por líquidos penetrantes fluorescentes. Con ellos se pretende determinar la existencia, o no, de discontinuidades superficiales. Por último, se realizará un ensayo de ultrasonidos. Este es el método más fiable y preciso. Ofrece información sobre posibles fisuras en el interior del cordón de soldadura.



Elaboración del Procedimiento Escrito de Ejecución y  
Control de Calidad de una Unión Soldada de  
Virolas de Acero





# CAPÍTULO VI. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

Para la realización de este estudio se va a contar con planchas de acero al carbono AISI 1045. En diferentes normativas este acero recibe las siguientes denominaciones:

- IHA: F-114
- CENIM: F-1140/ C45 K
- DIN: CK45
- B.S.: EN8
- UNI: C-45

## 6.1.- ANÁLISIS QUÍMICO DEL MATERIAL

La composición química del acero es la siguiente:

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
0.46%	0.32%	0.72%	0.017%	0.011%	0.17%	0.16%	0.06%

## 6.2.- ENSAYOS TECNOLÓGICOS

Tras realizar una serie de pruebas sobre el material base se han obtenido las siguientes características mecánicas del material:

**Dureza:**

$$HB = 200$$

**Límite de rotura:**

$$\sigma_R = 630 \text{ MPa}$$

**Límite elástico:**

$$\sigma_E = 400 \text{ MPa}$$

**Porcentaje de alargamiento**

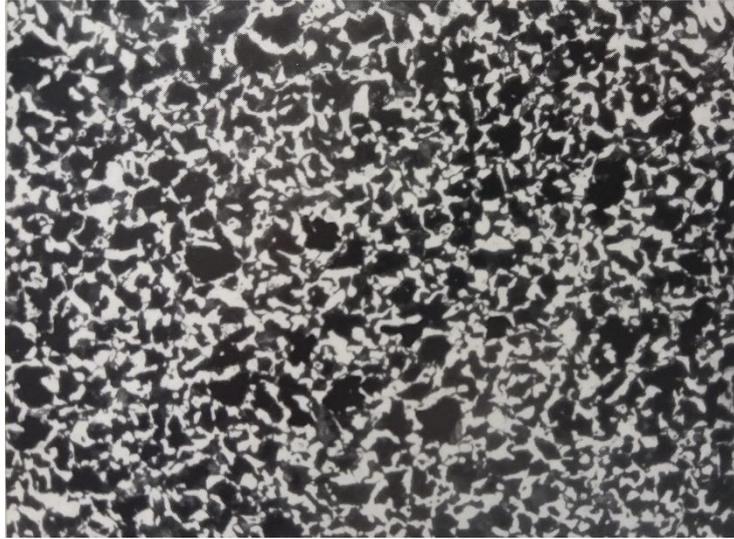
$$A\% = 12\%$$

**Resiliencia**

$$\rho = 392.4 \text{ KJ/m}^2$$



## 6.3- ANÁLISIS METALOGRAFICO



*Fig. 6.1. Micrografía acero 100 aumentos*

La microestructura es característica de un acero de 0.45% en carbono normalizado. Está formado por perlita y ferrita, con un cierto carácter reticular.



## CAPÍTULO VII. VALIDACIÓN

Para la validación, del supuesto cuantificado de las variables de ejecución de la unión soldada se seguirá el procedimiento marcado por la Sección IX del Código ASME (American Society of Mechanical Engineers). Para la elaboración del procedimiento escrito de soldadura se utilizará un proceso iterativo de prueba y error. Esta etapa se la conoce como validación o maquetado. Como se ha mencionado anteriormente el maquetado es un proceso iterativo basado en la prueba y error.

Para la realización de la prueba se utilizarán los denominados cupones de soldadura. En el código ASME se referirán a ellos como especímenes. Los cupones de soldadura son probetas de soldadura ejecutadas según los criterios y conocimientos previos. Según esos valores se realiza un primer cupón que es sometido a los diferentes ensayos destructivos.

Mediante esos ensayos se determina la validez o no del cupón en función de los criterios dictaminados. Si el cupón no es válido se han de modificar algunas de las variables y parámetros de soldadura y realizar un nuevo espécimen.

Este proceso será repetido hasta encontrar un cupón que cumpla los requisitos impuestos. El cupón que cumpla lo preestablecido se denominará cupón de referencia. Una vez obtenido el cupón de referencia se repite de forma análoga. Este nuevo cupón es analizado mediante ensayos no destructivos. Si a través de los END se determina que el cupón es válido se puede proceder a redactar el procedimiento escrito de soldadura y el control de calidad para la realización de esa soldadura en la industria.

En el código ASME el procedimiento escrito de soldadura se denomina como Especificación del Procedimiento de Soldar. Su abreviatura será (WPS) derivada de *Welding Procedure Specification*. La certificación de calidad se conoce como Registro de Calidad del Procedimiento, con siglas (PQR) derivadas de *Procedure Qualification Record*.

Según el apartado QW-100.1, del artículo I, de la Sección IX del código ASME, el propósito de la Especificación del Procedimiento de Soldar (WPS) y del Registro de Calificación del Procedimiento (PQR) es determinar que el conjunto de partes soldadas propuesto para construcción sea capaz de proveer las propiedades requeridas para su aplicación destinada. Se presupone que el soldador o el operario de soldadura que efectúa la prueba de calificación del procedimiento de soldar es un trabajador experimentado. Esto es, la prueba de calificación del procedimiento de soldar establece las propiedades del conjunto soldado, no la experiencia del soldador o del operario de soldadura. Una WPS relaciona las variables, tanto esenciales como no esenciales, y los órdenes aceptables de estas variables, al usar la WPS. La WPS se destina a proveer dirección para el soldador/operario de



soldadura. El PQR relaciona lo que se usó al calificar la WPS y los resultados de las pruebas.

Durante todo el artículo I, adjunto como anexo, se pone en conocimiento de manera general el propósito de un procedimiento escrito de soldadura, su alcance y responsabilidades. Además, se realiza una pequeña mención de las pruebas necesarias, el número de especímenes y los criterios de aceptación.

Según el apartado QW-200.1, del artículo II, de la sección IX del código ASME, se define una WPS como un procedimiento de soldadura calificado y escrito preparado para proveer dirección para hacer soldaduras de producción en conformidad con los requerimientos del código. Su contenido deberá describir todas las variables esenciales, no esenciales y, cuando se requiera, las variables esenciales suplementarias para cada uno de los procesos de soldadura utilizados. Esas variables se encuentran en listas. Para los procesos utilizados en este proyecto, MAG y TIG, se encuentran en los apartados QW-255, QW-255.1, QW256 y QW-256.1. Durante este artículo también se especifica la posibilidad de realizar modificaciones en la WPS y de qué grado.

Según el apartado QW-200.2, del artículo II, de la sección IX del código ASME, se define un PQR como un registro de los datos de soldadura usados para soldar una muestra de prueba. El PQR es un registro de variables registradas durante la soldadura de las muestras de prueba. Contiene también los resultados de las pruebas de los especímenes probados.

Durante el resto del artículo II se describen con mayor detenimiento el tipo de pruebas requeridas, número de cupones, criterios de validez, así como, una descripción de cómo se ha de preparar la muestra.

Como anexo a este trabajo se adjuntarán las secciones ya mencionadas QW-255 y QW-256 con las variables de soldadura de los procesos utilizados, la sección QW-422 con los datos de tensiones máximas en función del material, QW-450 hasta QW-462.4, QW-463 y desde QW-466 hasta QW-466.3 con los especímenes de prueba en función del ensayo a realizar y los criterios de aceptación y las posiciones de soldeo.

## 7.1.- CUPONES DE SOLDADURA

### 7.1.1.- CUPÓN 1

El primer cupón se realizará según las condiciones especificadas en el capítulo 5 y que serán:

#### Geometría:

- Espesor: 10 mm.
- Talón: 2 mm.
- Separación de la junta 1.6 mm.



- Ángulo de la junta 70°.
- Ángulo inverso de las piezas para reducir la deformación 3°
- Punteado por la cara de respaldo cada 75 mm.

**Valores TIG, pasada de raíz:**

- Electrodo:  $d=2.4$  mm al 2% de torio afilado a 15°.
- Posición de la antorcha:  $\alpha=50^\circ$
- Tensión de vacío: 60 V corriente continua (DC).
- Tensión de soldadura: 16 V (DC).
- Polaridad directa
- Intensidad fuente 1: 130 A (DC).
- Intensidad fuente 2: pulsada + 130 A.
- Frecuencia: 400Hz.
- Preflujo de gas: 2 s.
- Postflujo de gas: 6 s.
- Caudal de gas: 9 l/min.
- Velocidad de avance: 100 mm/min.
- Temperatura precalentamiento:  $\theta_p=230\pm 10^\circ\text{C}$

Según estas variables el resultado obtenido es el siguiente:

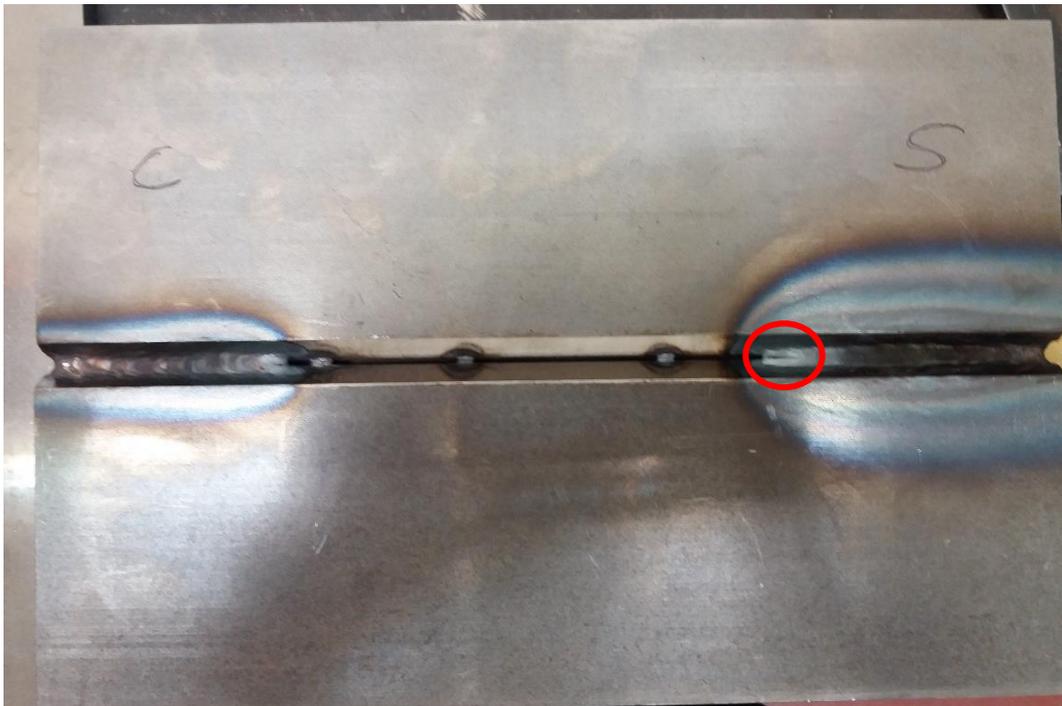


Fig. 7.1. Cupón 1, cara superior

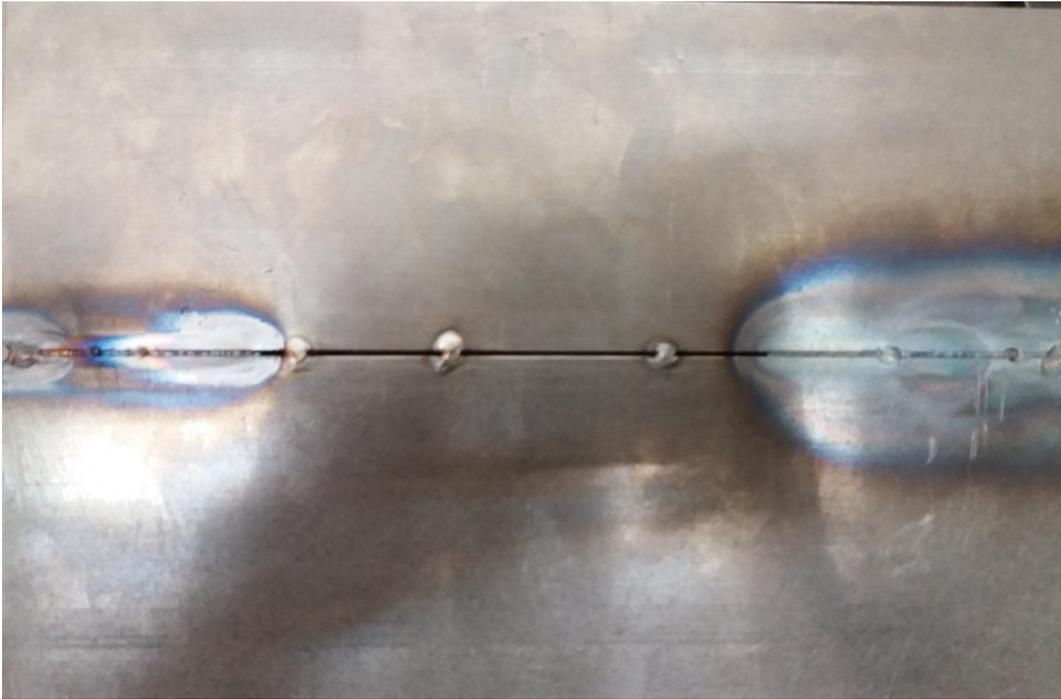


Fig. 7.2. Cupón 1, cara de respaldo

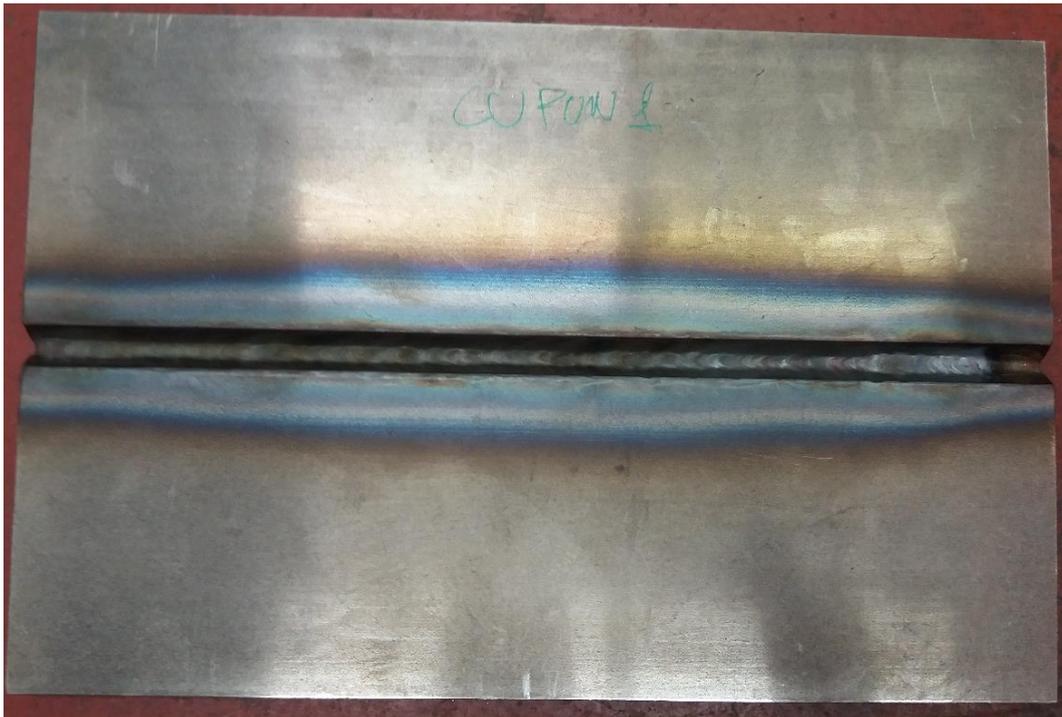
Este cupón no es válido debido a que el material se funde y se atraviesa la chapa sin conseguir una formación adecuada del cordón. Además de eso hay falta de penetración y aparecen defectos como grietas. La aparición de grietas es debida al elevado contenido en carbono del acero, lo que dificulta su soldadura.



Fig. 7.3. Grieta en el cordón de soldadura del cupón 1

### 7.1.2.- CUPÓN 2

Para evitar los desprendimientos del cordón de soldadura se ha modificado la separación de la junta. En su lugar ahora será de 1.2 mm. Las demás variables se han mantenido constantes. El resultado es el siguiente:



*Fig. 7.4. Cupón 2, cara superior.*



*Fig. 7.5. Cupón 2, cara de respaldo.*

Lo primero que se puede observar es que este cupón tampoco es válido. Esto se debe a la falta de penetración debido a la pasada de raíz



### 7.1.3.- CUPÓN 3

Para intentar eliminar la falta de penetración de nuevo se va a modificar la geometría de la unión sin modificar las variables correspondientes al proceso TIG. En este caso se ha variado respecto al cupón anterior el ángulo de la junta. Con ello se pretende obtener una penetración completa. El nuevo ángulo de la junta es de  $90^\circ$ . Con ello se obtiene el siguiente resultado:



*Fig. 7.6. Cupón 3, cara superior.*

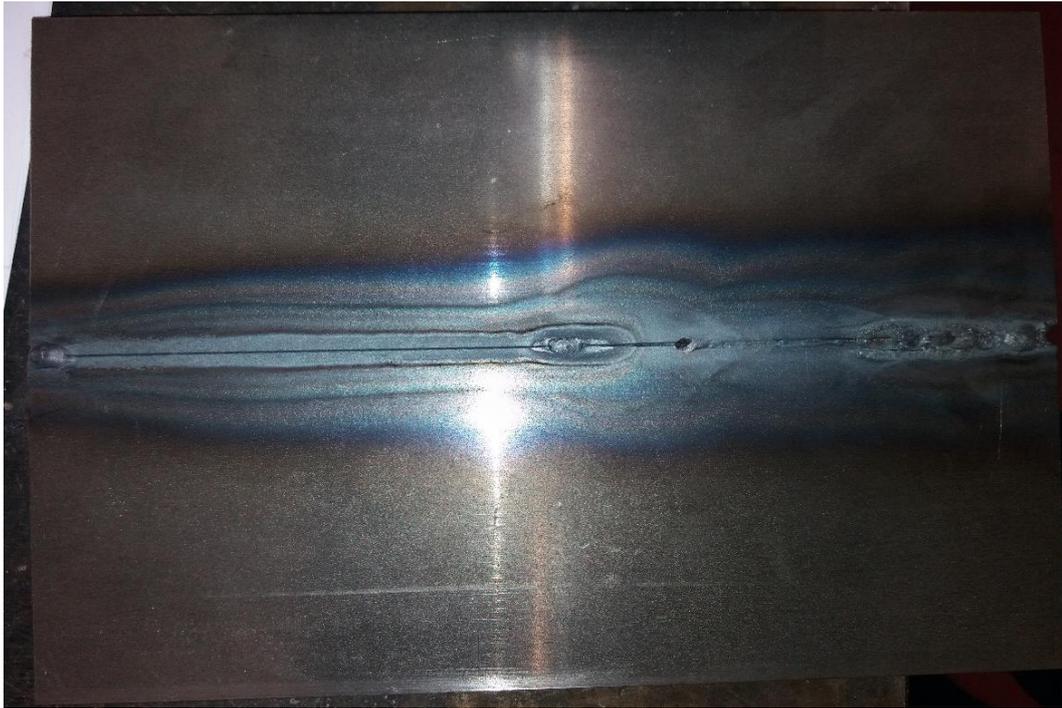


Fig. 7.7. Cupón 3, cara de respaldo.

Como se puede observar en las imágenes el problema de la falta de penetración sigue apareciendo. Se ha reducido, pero sigue siendo insuficiente para otorgar validez al cupón.



Fig. 7.8. Grieta de cráter en el cordón de soldadura del cupón3.

#### 7.1.4.- CUPÓN 4

Para evitar la falta de penetración se va a utilizar una varilla del mismo material utilizado posteriormente en el proceso MAG como material de aportación. Esta será del tipo ER 70S-6, pero a diferencia del MAG será de 2 mm de diámetro. Por tanto, el proceso deja de ser autógeno. En cuanto a las variables eléctricas del proceso TIG van a permanecer constantes. La geometría de la junta será la misma que la utilizada en el cupón 2, que incluía una separación de la junta de 1.2 mm. Además, se modificarán la velocidad



de soldeo y la posición de la antorcha. La primera se verá reducida ligeramente y el nuevo ángulo de la antorcha será de  $80^\circ$ . Siguiendo estas indicaciones el resultado obtenido es el siguiente:



Figura 7.9. Cupón 4, cara superior.



Fig. 7.10. Cupón 4, cara de respaldo.



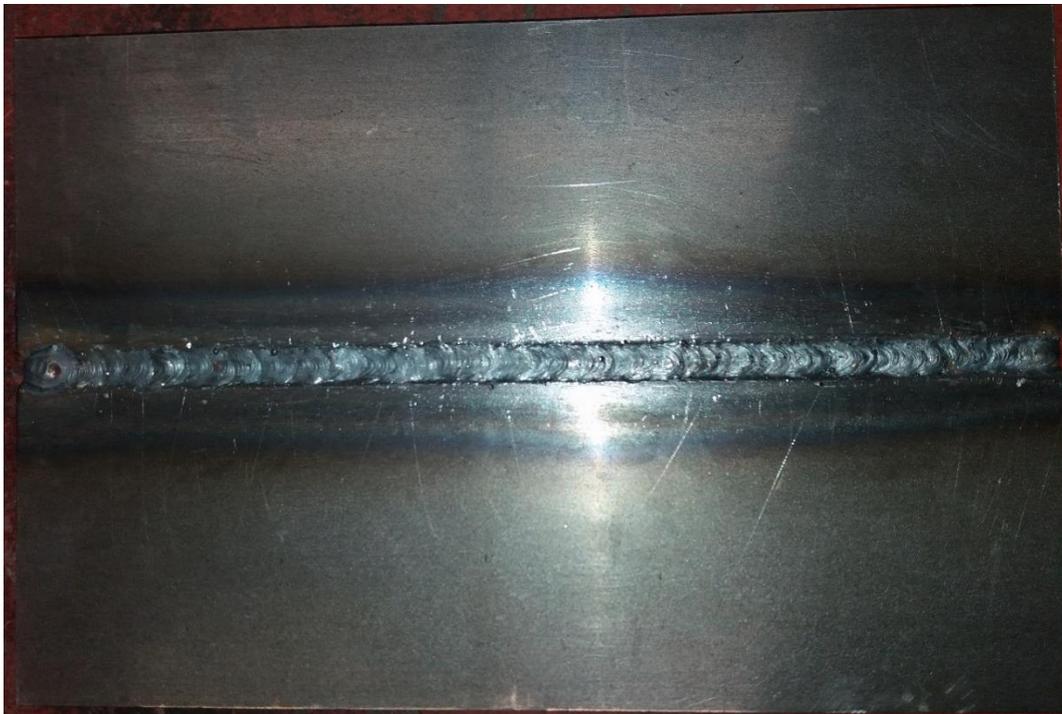
Como resultado se ha obtenido un cordón sano libre de grietas y con una penetración completa. Por tanto, se pueden dar como válidas las variables seleccionadas para la realización del cordón de raíz. Como detalle relativo al proceso se puede observar que la zona de afectación térmica es mayor que en los cupones anteriores. Esto se debe a la inclusión del material de aportación que calienta en mayor grado la unión soldada y disminuye la velocidad de ejecución

Una vez encontrados los valores necesarios para la realización de la pasada de raíz se han de determinar el resto de variables para realizar las pasadas de relleno. Como ya se ha comentado anteriormente se van a realizar con un proceso MAG. Los valores elegidos inicialmente son:

**-1ª Pasada:**

- Intensidad: 235 A (DC).
- Tensión de soldadura: 22.5 V (DC).
- Polaridad directa
- Velocidad de avance: 250 mm/min.
- Velocidad de aporte del hilo: 3.6 m/min.
- Caudal de gas: 10 l/min.
- Temperatura mínima entre pasadas:  $\theta=210^{\circ}\text{C}$

Como resultado de la primera pasada se obtiene lo siguiente:



*Fig. 7.11. 1ª pasada relleno*



## Elaboración del Procedimiento Escrito de Ejecución y Control de Calidad de una Unión Soldada de Virolas de Acero

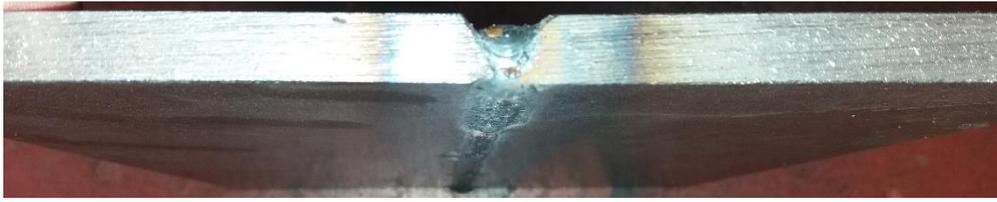


Fig. 7.12. Perfil cupón 4 tras 1ª pasada de relleno

Como se puede observar tras la realización de la pasada de raíz y la 1ª pasada de relleno el cupón no sufre grandes deformaciones.

Para la realización de la segunda pasada de relleno se ha de variar la velocidad de avance y la polaridad. En este caso pasa a ser de 200 mm/min ya que se ha de rellenar más espacio y se ha de utilizar polaridad inversa. Con ello se consigue un cordón más ancho. El resultado tras la segunda pasada es el siguiente:

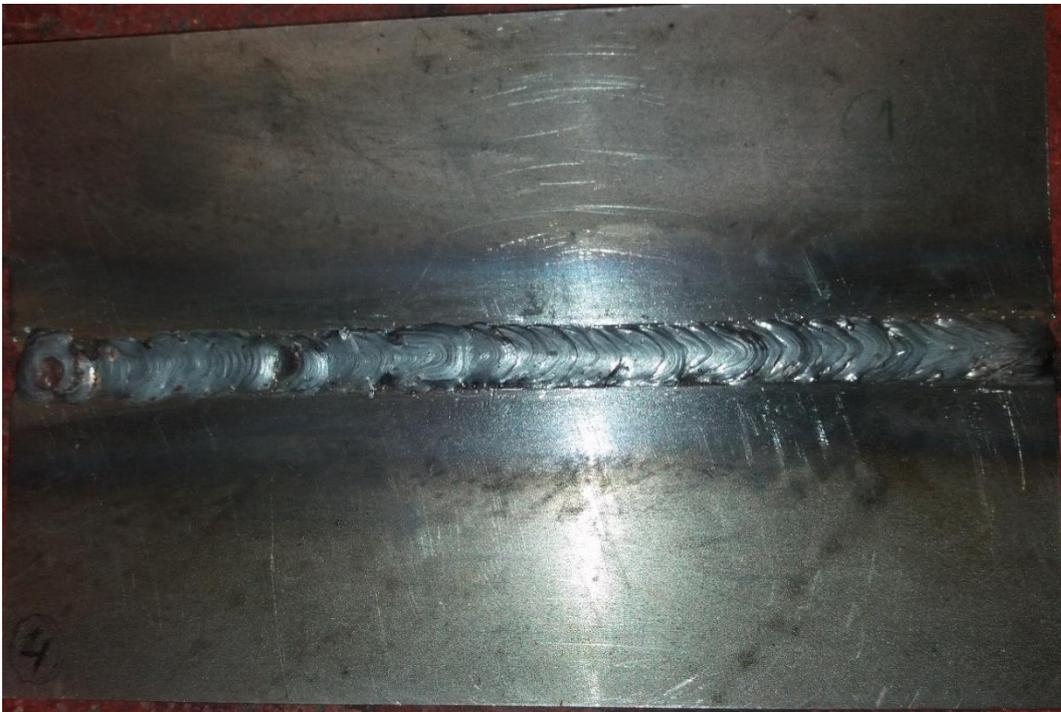


Fig. 7.12. 2ª pasada de relleno.



Fig. 7.13. Perfil cupón 4 tras 2ª pasada de relleno.

Como se puede observar en la imagen anterior, tras la segunda pasada de relleno, se produce una ligera deformación. Sin embargo, esa deformación es totalmente admisible y el aspecto del cordón es el de un cordón completamente sano. Este será el denominado cupón de referencia.



Para comprobar su total validez se han de realizar los siguientes ensayos desarrollados en los apartados siguientes.

## 7.2.- ENSAYOS DESTRUCTIVOS

### 7.2.1.- ENSAYO DE TRACCIÓN

Para realizar el ensayo de tracción primero sea determinar el tamaño de las probetas. Para ello se seguirán las indicaciones de la norma UNE-EN ISO 6892-1. Al tratarse de producto plano con un espesor superior a 3mm se seguirá el anexo D.

En primer lugar, se definen las siguientes dimensiones:

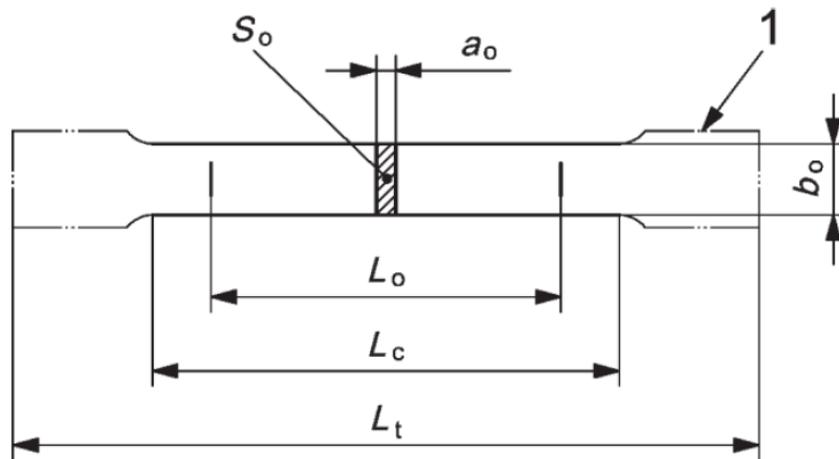


Fig. 7.14. Dimensiones probeta ensayo a tracción

- **L<sub>o</sub> (longitud inicial entre puntos):** marca la longitud entre puntos sobre la probeta, medida a temperatura ambiente antes del ensayo.
- **L<sub>c</sub> (longitud calibrada):** longitud de la parte calibrada de la probeta que representa una sección más reducida.
- **L<sub>t</sub> (longitud total):** longitud total inicial de la probeta.
- **S<sub>o</sub>:** área de la sección transversal inicial de la parte calibrada.
- **a<sub>o</sub>:** espesor inicial de una probeta plana.
- **b<sub>o</sub>:** anchura inicial de la parte calibrada de una probeta plana.

Para probetas proporcionales se ha de cumplir la siguiente relación:

$$L_0 = k\sqrt{S_0}$$

Donde el coeficiente de proporcionalidad  $k$  vale 5.65. La longitud inicial,  $L_0$ , nunca ha de ser menor a 15mm. En casos donde el área de la



sección transversal sea demasiado pequeña para que cumpla este requisito puede usarse un valor  $k=11.3$  o utilizar probetas no proporcionales. Por tanto:

$$L_0 = 5.65\sqrt{S_0}$$

En el caso de probetas proporcionales distintas a las de sección transversal circular se ha de cumplir que:

$$L_c \geq L_0 + 1.5\sqrt{S_0}$$

Otra recomendación marcada por la normativa es que la relación entre el ancho de la probeta y el espesor no exceda la proporción 8:1.

Debido a las dimensiones de las planchas de acero (500X100X10mm) la longitud máxima de las probetas será de  $L_t=200$  mm.

Debido a la configuración la máquina para la realización del ensayo y sus mordazas la longitud de las cabezas de la probeta será de  $L_{cabeza}=40$ mm.

Teniendo en cuenta la longitud de las cabezas de la probeta y su longitud total podemos obtener la longitud calibrada de modo que:

$$L_c = L_t - 2L_{cabeza} = 200mm - 2 * 40mm = 120mm$$

Una vez obtenida la longitud calibrada y combinando las dos ecuaciones anteriores podemos obtener la sección inicial y con ella la longitud inicial. Para este primer cálculo tomaremos el caso límite donde  $L_c = L_0 + 1.5\sqrt{S_0}$ :

$$\left. \begin{array}{l} L_0 = 5.65\sqrt{S_0} \\ L_c = L_0 + 1.5\sqrt{S_0} \end{array} \right\} \rightarrow L_c = 5.65\sqrt{S_0} + 1.5\sqrt{S_0} = 7.15\sqrt{S_0}$$

Por tanto:

$$S_0 = \left(\frac{L_c}{7.15}\right)^2 = \left(\frac{120mm}{7.15}\right)^2 = 281.676 \text{ mm}^2$$

Si el espesor de la probeta viene marcado por el de la plancha,  $a_0=10$ mm, el ancho de la zona calibrada será:

$$b_0 = \frac{S_0}{a_0} = \frac{281.676 \text{ mm}^2}{10 \text{ mm}} = 28.1676mm$$

Si sustituimos en la primera ecuación obtenemos la longitud inicial:

$$L_0 = 5.65\sqrt{S_0} = 5.65\sqrt{281.676 \text{ mm}^2} = 94.825 \text{ mm}$$

En este caso se cumplirían todos los parámetros y relaciones prestablecidas. Sin embargo, un ancho de 28.1676mm es difícil de conseguir.



Por ello se establecerá un ancho de 28mm y se comprobará si se siguen cumpliendo los requisitos. Primero se determina la nueva sección:

$$S_0 = b_0 * a_0 = 28 \text{ mm} * 10 \text{ mm} = 280 \text{ mm}^2$$

Con esa sección la longitud inicial será:

$$L_0 = 5.65\sqrt{S_0} = 5.65\sqrt{280 \text{ mm}^2} = 94.542583 \text{ mm}$$

Comprobamos la validez de los nuevos valores:

$$L_0 \leq L_c - 1.5\sqrt{S_0} = 120\text{mm} - 1.5\sqrt{280 \text{ mm}^2} = 94.9\text{mm}$$

Según la ecuación anterior:  $L_{0max} = 94.9 \text{ mm}$  y  $L_{0min} = 15 \text{ mm}$  para una sección  $S_0 = 280 \text{ mm}^2$ .

Se cumple que:

$$94.542 \text{ mm} = L_0 < 94.9 \text{ mm} = L_{0max}$$

Como se puede observar también se cumple que la relación entre el ancho y el espesor es inferior a 8:1 y la longitud inicial  $L_0$  es superior a los 15 mm establecidos en la norma. Por tanto, esta probeta sería válida y tendría los siguientes valores:

$$L_0 = 94.542583 \text{ mm}$$

$$S_0 = 280 \text{ mm}^2$$

$$b_0 = 28 \text{ mm}$$

Para la realización del ensayo se ha utilizado una máquina Shimadzu capaz de ejercer 500 KN de fuerza.



## Elaboración del Procedimiento Escrito de Ejecución y Control de Calidad de una Unión Soldada de Virolas de Acero



Fig. 7.15. Máquina ensayo de tracción

El ensayo se realizará a una velocidad constante de 5 mm/min hasta la rotura de la probeta. En la siguiente imagen se puede observar el sistema de amarre de las probetas.

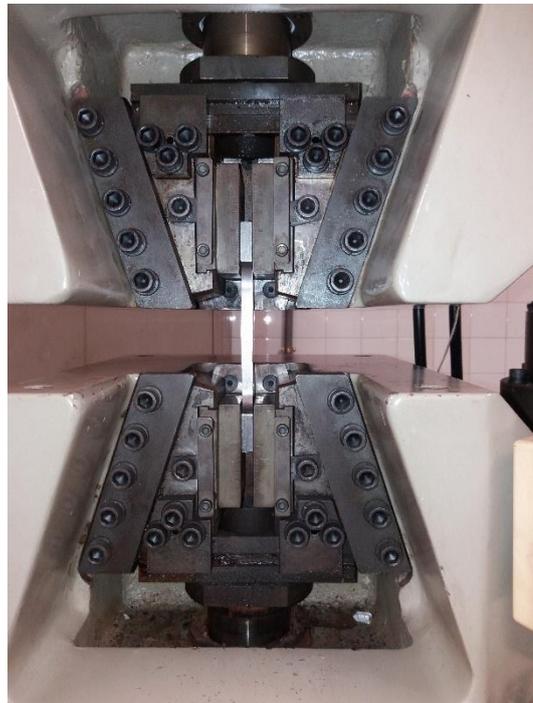


Fig. 7.16. Sistema de agarre máquina de tracción



## Elaboración del Procedimiento Escrito de Ejecución y Control de Calidad de una Unión Soldada de Virolas de Acero



Fig. 7.17. Probeta de tracción

Se han ensayado dos probetas diferentes del mismo cupón, denominadas 11T y 12T, obteniéndose los siguientes resultados:

**Cargas de rotura:**

$$C_{11T} = 167 \text{ KN}$$

$$C_{12T} = 168 \text{ KN}$$

Para una sección de  $280 \text{ mm}^2$  la tensión de rotura obtenida será la siguiente:

**Tensión de rotura:**

$$\sigma_{R11t} = 598 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{R12t} = 601 \text{ MPa}$$



## 7.2.2.- ENSAYO DE DOBLADO

Para el ensayo de doblado se va a utilizar una máquina específica para este tipo de ensayo de la marca S.I.A.I.S.A. Como ya se ha comentado anteriormente el espesor de la probeta es de 10 mm. Siguiendo la normativa, al ser probetas de menos de 12 mm, se van a utilizar rodillos de 25 mm de radio. El diámetro del punzón debe estar comprendido entre 2-3 veces el espesor de la probeta. Por ello se utiliza uno con 25 mm de diámetro. Para la separación entre rodillos se ha de cumplir la siguiente expresión:

$$l = (D + 3a)$$

Siendo  $l$  la distancia entre rodillos,  $D$  el diámetro del punzón y  $a$  el espesor de la probeta. En este caso la distancia de rodillos es:

$$l = 25\text{mm} + 3 * 10\text{mm} = 55\text{mm}$$



Fig. 7.18. Máquina para ensayo de doblado

Este se ha realizado sobre dos probetas del mismo cupón, una por la superficie de raíz y otra por la cara. El final del ensayo viene marcado por la aparición de las primeras grietas. El resultado obtenido es aceptable.



Fig. 7.19. Probeta doblado



### 7.2.3.- ENSAYO DE RESILIENCIA

Para la realización del ensayo se utiliza un péndulo de Charpy como el que se puede observar en la siguiente imagen.



Fig. 7.20. Péndulo de Charpy

Se utiliza una probeta con una entalla situada en el centro del cordón de soldadura.



Fig. 7.21. Probeta resiliencia

El valor de resiliencia según el ensayo es de **372.8 KJ/m<sup>2</sup>**.



## 7.2.4.- ENSAYO DE DUREZA

El ensayo de dureza se ha realizado según el método Brinell. Para su realización se ha utilizado un durómetro de la marca Centaur como el que se puede observar en la imagen.



Fig. 7.22. Durómetro Brinell

Se ha realizado mediciones en 5 zonas dispuestas según el esquema. Para la obtención de la dureza se ha seguido el método de triangulación.

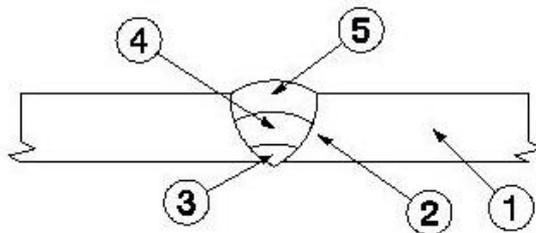


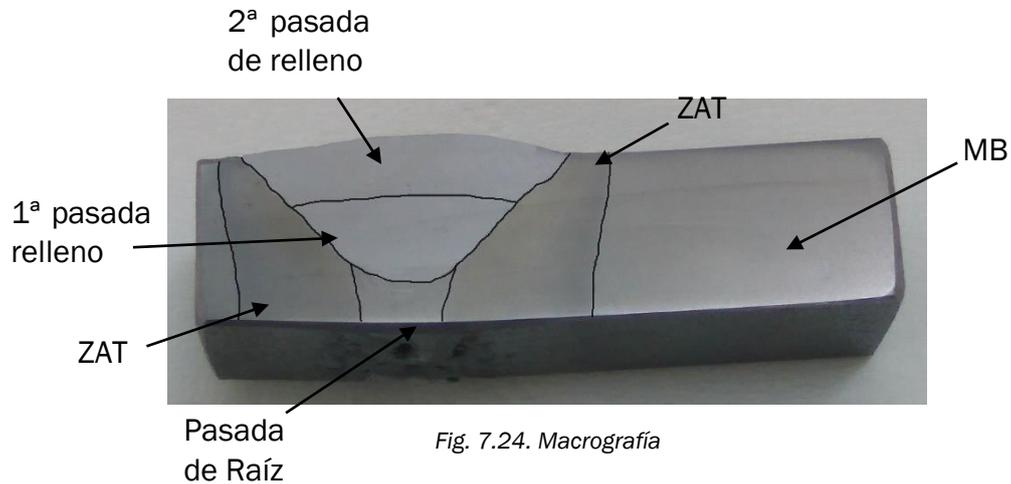
Fig. 7.23. Posición medidas dureza

Medida	Descripción	Valor
1	Medida sobre la zona de metal base	200 HB
2	Medida sobre la ZAT	300 HB
3	Medida sobre el cordón, pasada de raíz	210 HB
4	Medida sobre el cordón, 1ª pasada de relleno	230 HB
5	Medida sobre el cordón, 2ª pasada de relleno	260 HB

Como se puede observar la dureza aumenta en el cordón de soldadura respecto al metal base. Dentro del cordón la zona más dura es la de la última pasada ya que las otras pasadas han sufrido un tratamiento térmico al realizarse las siguientes.



## 7.3.- METALOGRAFÍA



## 7.4.- ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Una vez completados todos los ensayos destructivos y metalográficos, y comprobada la validez del cupón, se realizan los ensayos no destructivos. Estos se ejecutan sobre un cupón análogo al cupón de referencia. En este caso serán tres ensayos: inspección visual, líquidos penetrantes y ultrasonidos.

### 7.4.1.- INSPECCIÓN VISUAL

En este caso la inspección visual se ha llevado a cabo tras la realización de cada pasada y con el cupón finalizado. Primero con el punteado de las placas:



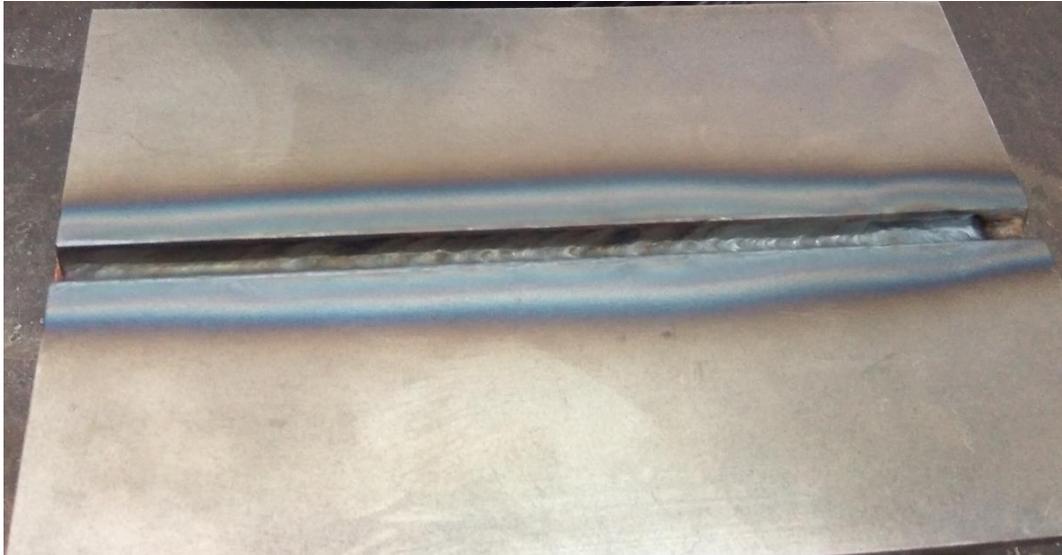
*Fig. 7.25. Punteado del cupón*



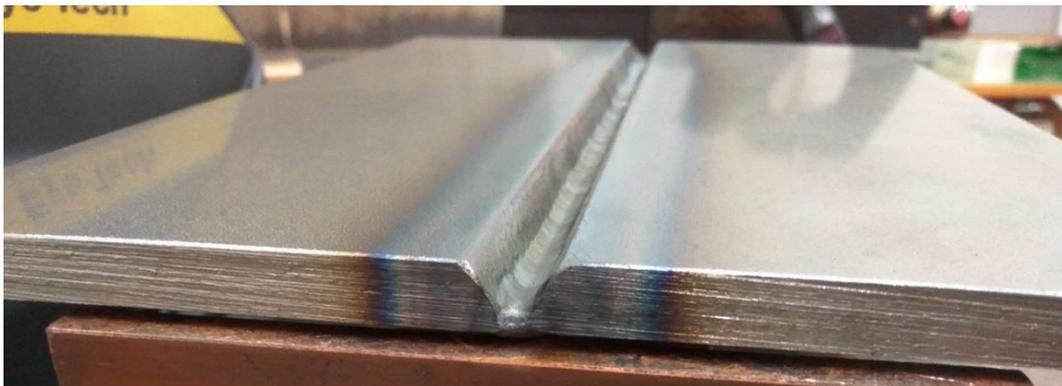
*Fig. 7.26. Ampliación punteado del cupón*



Como se puede ver los puntos están libres de grietas y han conseguido una penetración suficiente para la fijación de las placas. Lo siguiente es comprobar el estado de la pasada de raíz.



*Fig. 7.27. Pasada de raíz en la cara*



*Fig. 7.28. Pasada de raíz en la cara visa desde el perfil*

Como se puede observar en las fotografías el aspecto del cordón es sano y con ausencia de grietas u otro tipo de defectos. Tras esto se procedería a la soldadura de las pasadas de relleno.

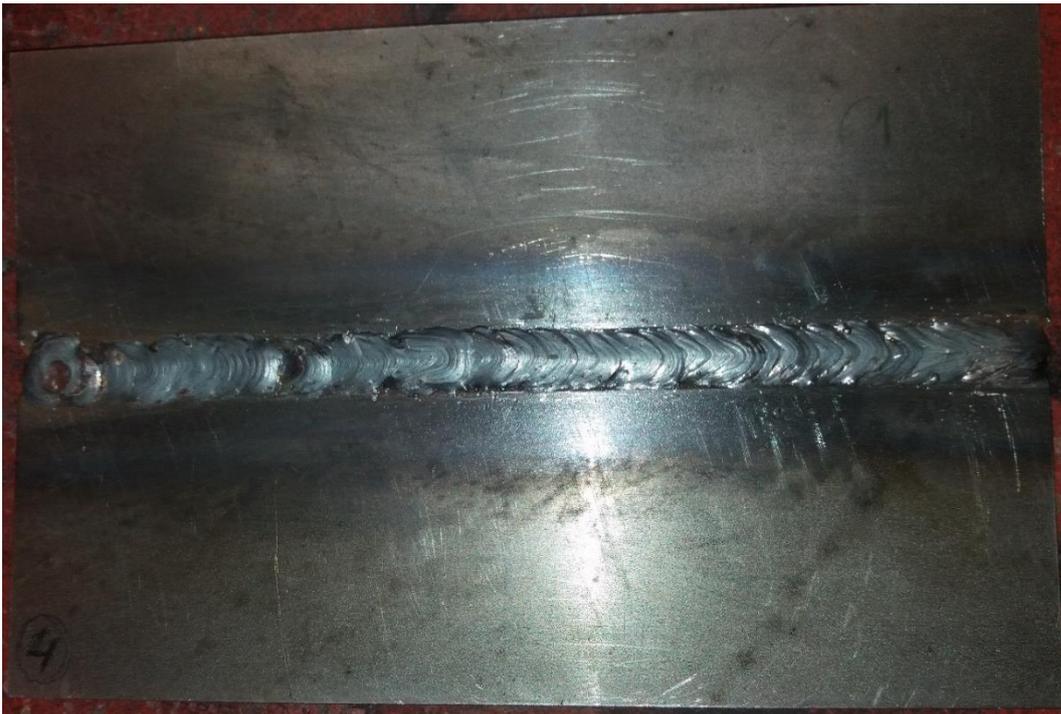


Fig. 7.29. Cupón tras pasadas de relleno

A simple vista se puede observar un cordón de aspecto sano, sin grietas.

#### 7.4.2.- LÍQUIDOS PENETRANTES

Tras la inspección visual se comienza la inspección con líquidos penetrantes. En este caso la inspección se realiza con líquidos penetrantes fluorescentes. Estos incluyen una etapa más que los coloreados ya que el lavado se realiza en dos fases. La primera fase es la aplicación del líquido.

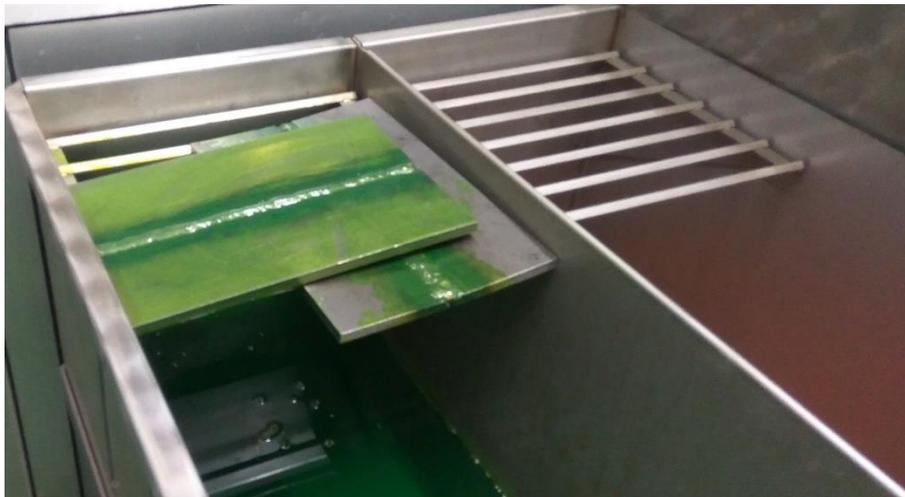
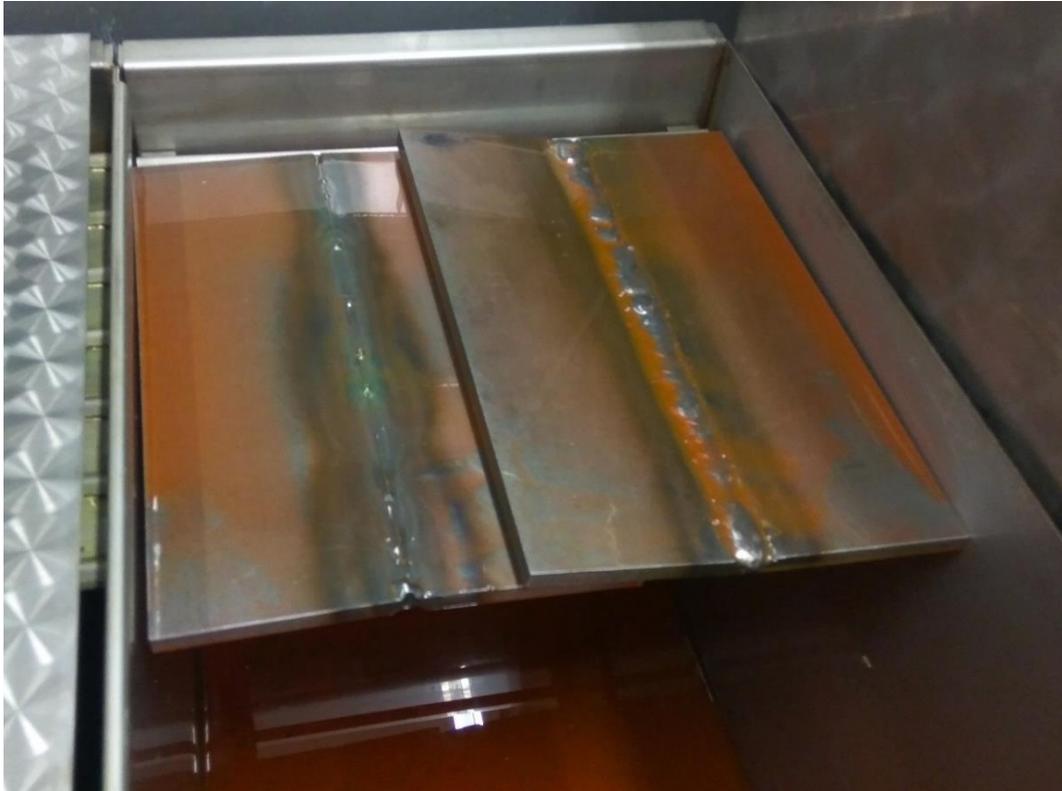


Fig. 7.30. Aplicación de líquidos penetrantes

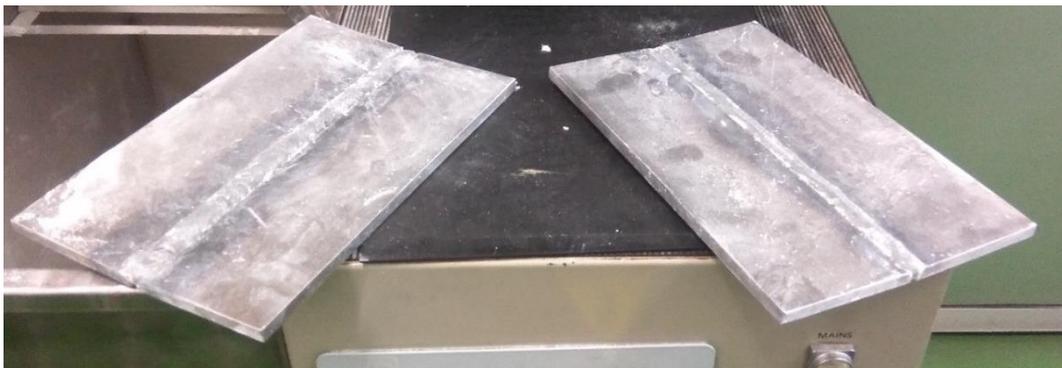


La segunda fase es la aplicación de una emulsión limpiadora que se encarga de eliminar el exceso de líquido y a su vez de fijar el líquido retenido en las piezas.



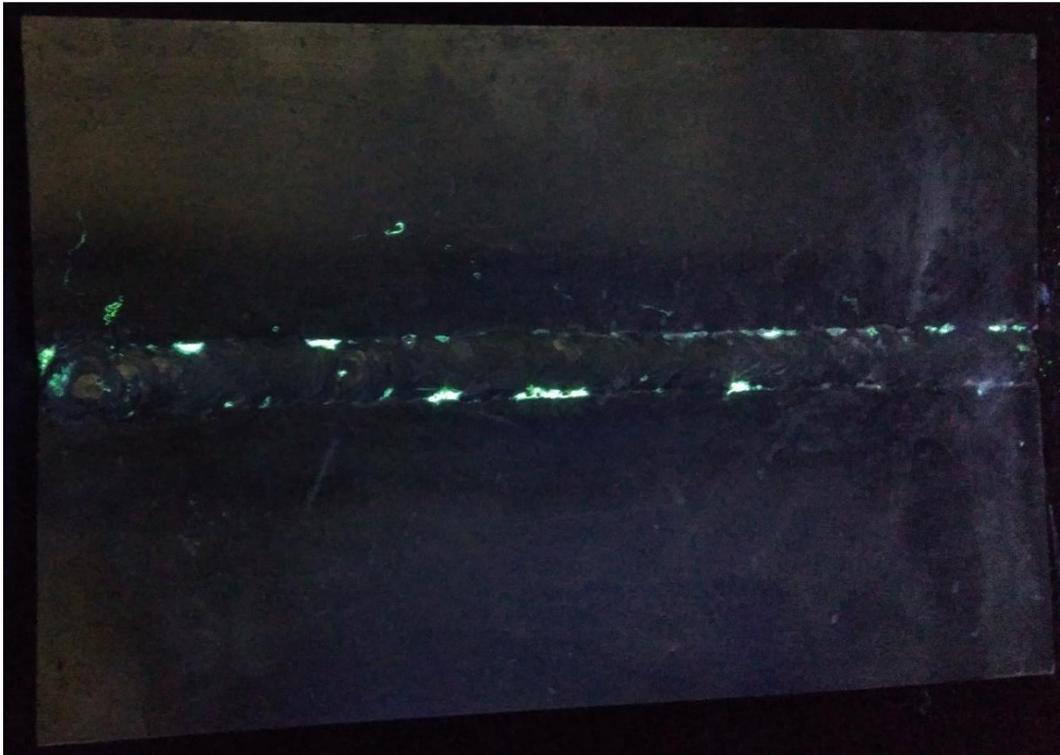
*Fig. 7.31. Aplicación de la emulsión para el lavado*

A continuación, se lava el cupón con agua y cuando está seco se aplica el revelador.



*Fig. 7.32. Aplicación del revelador*

Tras esperar unos minutos se puede proceder a la inspección. Para ello se han de iluminar las piezas mediante luz ultravioleta.



*Fig. 7.33. Líquidos penetrantes sobre cara*



*Fig. 7.34. Líquidos penetrantes sobre raíz*

Como se puede observar hay pequeñas retenciones de líquido en las zonas laterales del cordón. Esas indicaciones se corresponden con efectos de retención del cordón y pequeñas anomalías en la ejecución del cordón. Todas



ellas se dan en el sobreespesor por lo que no son relevantes. Además, no hay ningún indicio de grieta.

### 7.4.3.- ULTRASONIDOS

Para el ensayo de ultrasonidos se limpia la superficie de la pieza, se aplica un gel y se procede a la inspección como se aprecia en la imagen.



*Fig. 7.35. Inspección por ultrasonidos*

El resultado del ensayo con ultrasonidos ha sido positivo y no se ha detectado la presencia de ninguna grieta interna. Por tanto, y tras obtener resultados favorables en todas las pruebas realizadas se puede decir que el cupón es totalmente válido y se puede realizar el procedimiento escrito de soldadura.



## 7.5.- PREVENCIÓN DE RIESGOS LABORALES

En base a la peligrosidad de los procesos de soldadura por su exposición a diferentes tipos de radiaciones, materiales a elevadas temperaturas y la utilización de equipos eléctricos, se requiere el cumplimiento de la normativa especificada en cuanto al uso de equipos de protección individual y equipos de protección de la zona de trabajo. En el Anexo II se realiza una breve descripción de los equipos y precauciones necesarias para llevar a cabo cualquier proceso de soldadura de los aquí tratados.



# **CAPÍTULO VIII. PROCEDIMIENTO ESCRITO DE SOLDADURA**

## **8.1.- ESPECIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO WPS**

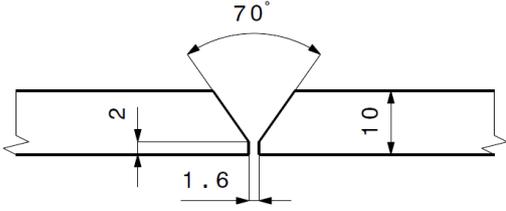
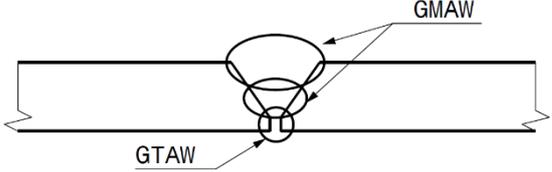
**ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA**  
**WELDING PROCEDURE SPECIFICATION**

Fecha:/ Date:

07/2017

<b>WPS N°:</b> 001	<b>PQR QUE LA AMPARA:</b> Suporting PQR:	01R	<b>COMPAÑÍA: /Company name:</b> EII Universidad de Valladolid
<b>PROCESO</b> Process	GTAW	GMAW (MAG)	<b>OBRA:/ Work N°:</b>  1/2017
<b>TIPO</b> Type	Manual	Manual	

**DISEÑO DE LA JUNTA: / Joint Design**

<b>PROCESO</b> Process	<b>RESPALDO</b> Backing	<b>MAT. RESPALDO</b> Backing Material	<b>CROQUIS / Sketch</b>  
GTAW MAG	No No	N.A. N.A.	
<b>RETENEDORES NO METÁLICOS:</b> Non Metallic Retainers:		N.A.	<b>SECUENCIA DE SOLDEO / Weld Sequence:</b>  
<b>RETEN. METÁLICOS NO FUSIBLES:</b> Non Fusing Metallic Retainers:		N.A.	
<b>POSICIÓN/ Position</b>			
<b>POSICIÓN DE RANURA:</b> Position of Groover:	1G (sobremesa)		
<b>PROGRESIÓN:</b> Weld Progression	Longitudinal		
<b>POSICIÓN DEL ÁNGULO:</b> Position of Groove:	N.A.		

**METAL BASE / Base metal**

<b>ESPECIFIC. DE MATERIAL:/ Material Specific.</b>	SAE-1045
<b>ESPEJOR DEL MATERIAL BASE:</b> Base Material Thikness:	10 mm

**METAL DE APORTE / Filler Material**

<b>PROCESO</b> Process	<b>ESPEJOR DEL MAT. DEPOSITADO</b> Thickness of Deposited W.M				
GTAW	2-3 mm				
GMAW	7-8 mm				
<b>ESPEJOR MÁXIMO POR PASADA:</b> Maximun thikness per pass:		< 5 mm			
<b>PROCESO</b> Process	<b>F</b> N°	<b>A</b> N°	<b>SFA</b>	<b>AWS</b>	<b>MARCA</b> Trade
GTAW GMAW				ER 70S-6 ER 70S-6	ARGON M-86 ARGON M-86

**TÉCNICA / Technique**

PROCESO: / Process	GTAW	GMAW
<b>CORDÓN RECTO O VAIVEN:</b> String or Weave Bead:	Recto	Ambos
<b>TAMAÑO BOQUILLA:</b> Orifice or Gas Cup Size:	10 mm	17 mm
<b>PASADAS UNICA O MULTIPLES POR CARA:</b> Single or Multiple Pass per Side:	Única	Múltiples
<b>SEPARACIÓN DEL ELECTRODO:</b> Electrode Spacing:	N.A.	N.A.
<b>CÁMARA CERRADA:</b> Closed Camber	No	N.A.

**CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS / Electrical Characteristics**

PROCESO Process	MATERIAL APORTE Filler Material	Ø (mm)	CORRIENTE / Current			VOLT Volts (V)	VELOC. Speed (mm/min)	FREC. Frec. (Hz)
			TIPO Type	POL. Pol.	AMPER. Amp. (A)			
GTAW	ER 70S-6	2	DC	DIR.	130	60	100	400
GMAW	ER 70S-6	1.2	DC	INV.	235	22.5	250	400
GMAW	ER 70S-6	1.2	DC	INV.	235	22.5	200	400

<b>ELECTRODO DE TUNGSTENO, TIPO Y TAMAÑO:</b> Tungsten Electrode, Type and Size:	EWTh 2; 2.4 mm Diámetro; 15° ángulo afilado
<b>RANGO DE VELOCIDAD DEL HILO:</b> Electrode Wire Feed Speed Range:	3.6 m/min
<b>CORRIENTE PULSADA PARA GTAW:</b> Pulsing current for GTAW:	SI
<b>MODO TRANSFERENCIA GMAW:</b> Transfer Mode GMAW:	Arco pulsado

**GAS DE PROTECCIÓN: / Shielding gas:**

PROCESO Process	GAS/ES Gas/es	COMPOSICIÓN Composition	CAUDAL Flow
GTAW	Ar	100 %	9 L/min
GMAW	Ar/CO <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	85%/13%/2%	10 L/min

<b>PREFLUJO DE GAS:</b> Gas Pre-flow	2 s
<b>POSTFLUJO DE GAS:</b> Gas Post-flow	6 s

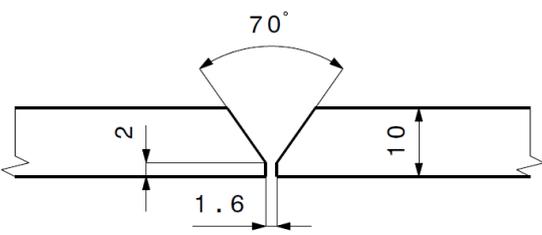
**PRECALENTAMIENTO / Preheating (mínima temperatura antes de empezar a soldar)**

<b>TEMP. MIN. DE PRECALENTAMIENTO</b> 230±10°C Min. Preheat Temperature		<b>MÁXIMA TEMP. ENTRE PASADAS</b> Maximum interpass temperatura	210 °C
<b>MANTENIMIENTO DEL PRECALENTAMIENTO</b> Preheat Maintenance	No	<b>MANT. PRECALENT. DESPUÉS SOLDADURA</b> Preheat Maintenance after Welding	No
<b>TRATAMIENTO TÉRMICO POSTSOLDADURA:</b> Post-Weld Heat Treatment:			No
<b>RANGO DE TEMPERATURA:</b> Temperatura Ranguge:			N.A.
<b>RANGO DE TIEMPO:</b> Time Range:			N.A.



## 8.2.- HOMOLOGACIÓN DE SOLDADOR WPQ

<b>REGISTRO DE CUALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE SOLDEO</b> Procedure Qualification Record			Fecha:/ Date: 07/2017
PQR N°: 01R	WPR SOPORTADO: Supported WPS:	001	COMPAÑÍA: /Company name: EII Universidad de Valladolid
PROCESO Process	GTAW	GMAW (MAG)	OBRA:/ Work N°:  1/2017
TIPO Type	Manual	Manual	

<b>DISEÑO DE LA JUNTA: / Joint Design</b>	<b>POSICIÓN/ Position</b>
<b>CROQUIS / Sketch</b> 	<b>POSICIÓN DE RANURA:</b> 1G (sobremesa) <b>Position of Groover:</b> <b>PROGRESIÓN:</b> Longitudinal <b>Weld Progression</b>

<b>METAL BASE / Base metal</b>	
<b>ESPECIFIC. DE MATERIAL:/ Material Specific.</b>	SAE-1045
<b>ESPELOR DEL MATERIAL BASE:</b> Base Material Thikness:	10 mm

<b>METAL DE APORTE / Filler Material</b>					
<b>PROCESO</b> Process	<b>F</b> N°	<b>A</b> N°	<b>SFA</b>	<b>AWS</b>	<b>MARCA</b> Trade
GTAW GMAW				ER 70S-6 ER 70S-6	ARGON M-86 ARGON M-86

<b>PRECALENTAMIENTO</b> Preheating	<b>TRATAMIENTO TÉRMICO POSTSOLDADURA:</b> Post-Weld Heat Treatment:
<b>TEMP. MIN. DE PRECALENTAMIENTO</b> 230±10°C Min. Preheat Temperature <b>MÁXIMA TEMP. ENTRE PASADAS</b> Maximum interpass temperatura	<b>TRATAMIENTO TÉRMICO POSTSOLDADURA:</b> No Post-Weld Heat Treatment: <b>RANGO DE TEMPERATURA:</b> N.A. Temperatura Ranguae: <b>RANGO DE TIEMPO:</b> N.A. Time Range:
210 °C	

<b>GAS DE PROTECCIÓN: / Shielding gas:</b>			
<b>PROCESO</b> Process	<b>GAS/ES</b> Gas/es	<b>COMPOSICIÓN</b> Composition	<b>CAUDAL</b> Flow
GTAW GMAW	Ar Ar/CO <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	100 % 85%/13%/2%	9 L/min 10 L/min
<b>PREFLUJO DE GAS: / Gas Pre-flow</b>	2 s		
<b>POSTFLUJO DE GAS: /Gas Post-flow</b>	6 s		

**CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS / Electrical Characteristics**

PROCESO Process	CORRIENTE / Current			VOLT Volts (V)	VELOC. Speed (mm/min)	FREC. Frec. (Hz)
	TIPO Type	POL. Pol.	AMPER. Amp. (A)			
GTAW	DC	DIR.	130	60	100	400
GMAW	DC	INV.	235	22.5	250	400
GMAW	DC	INV.	235	22.5	200	400

**ELECTRODO DE TUNGSTENO, TIPO Y TAMAÑO:**  
Tungsten Electrode, Type and Size:

EWTh 2; 2.4 mm Diámetro; 15° ángulo afilado

**TÉCNICA / Technique**

PROCESO: / Process	GTAW	GMAW
<b>CORDÓN RECTO O VAIVEN:</b> String or Weave Bead:	Recto	Ambos
<b>PASADAS UNICA O MULTIPLES POR CARA:</b> Single or Multiple Pass per Side:	Única	Múltiples

**ENSAYO DE TRACCIÓN / Tensile test**

PROBETA N° Specimen N°	ANCHURA (mm) Width	ESPESOR (mm) Thickness	ÁREA (mm <sup>2</sup> )	CARGA ROT. (N) Ultimate total load	TENSIÓN ROT. (N/mm <sup>2</sup> ) Ultimate unit stress	TIPO DE ROTURA Type of break
11T	28	10	280	167000	598	Rotura semiductil con salida labiada frágil a 45°
12T	28	10	280	168000	601	

**ENSAYO DE DOBLADO / Guided bend test**

TIPO Y FIGURA N° / Type and Figure N°	RESULTADO / Result
1DR → doblado en superficie de raíz	Acceptable
1DC → doblado en superficie de cara	Acceptable

PROBETA N° Specimen N°	UBICACIÓN ENTALLA Notch Location	TIPO ENTALLA Notch Type	TEMP. ENSAYO (°C) Test temp. (°C)	VALORES IMPACTO (J/m <sup>2</sup> ) Impact value (J/m <sup>2</sup> )
11R	Centrada	Recta	22°C	372.8

**OTROS ENSAYOS / Other Test**

<b>TIPO DE ENSAYO:</b> Type of test:	Dureza
<b>ANÁLISIS DEL DEPÓSITO:</b> Deposit analysis	200 HB (ZMB)/ 300 HB (ZAT) / 210-260 (cordón)
<b>OTROS:</b> Other:	



## CONCLUSIONES

Las principales conclusiones obtenidas durante la realización de este trabajo son las siguientes:

- El acero ocupa un 95% de la industria metalúrgica. Por eso es de vital importancia comprender como soldarlo para conseguir los resultados deseados. Durante la realización de los diferentes cupones se ha confirmado que las técnicas de soldadura TIG y MAG ofrecen excelentes resultados para la soldadura de este tipo de material.
- Al tratarse de un acero con un elevado contenido en carbono su soldadura puede generar dificultades. Por ello es necesario el uso de un precalentamiento y una temperatura entre pasadas superior a los 200°C, además de las ya mencionadas técnicas de soldeo y soldadores con una gran experiencia.
- El material es totalmente válido para la construcción de depósitos. Además, la soldadura realizada como se indica en el procedimiento escrito de soldadura cumple con todos los requisitos necesarios planteados, tanto físicos, químicos y microestructurales. Además de las tecnológicas y de calidad.
- El equipamiento eléctrico utilizado para la realización de uniones soldadas es de gran complejidad, sobre todo a nivel electrónico. Esto permite modificar un gran número de variables para conseguir las mejores calidades. Además, pequeñas variaciones en cualquiera de las variables de soldeo como en el diseño de la junta pueden afectar en gran manera al resultado de la unión.
- Las diferentes metodologías de control de calidad utilizadas permiten, mediante una correcta utilización, asegurar el nivel de calidad requerido en las uniones soldadas.



Elaboración del Procedimiento Escrito de Ejecución y  
Control de Calidad de una Unión Soldada de  
Virolas de Acero





# BIBLIOGRAFÍA

## LIBROS

Reina Gómez, M. Soldadura de los aceros. Aplicaciones. Weld-Work S.L. 4ª Edición. (2003).

Coca Rebollero, P. Rosique Jiménez, J. Ciencia de materiales. Teoría-ensayos-tratamientos. Ediciones Pirámide S.A. 14ª Edición. (1992).

Granjon, H. Bases metalúrgicas de la soldadura. Publicaciones de la soldadura autógena. (1993)

Martínez Massoni, J.M. Normas de construcción de recipientes a presión. Guía del código ASME sección VIII. Bellisco Ediciones. 1ª Edición (2008).

## PUBLICACIONES

Junta de Castilla y León. Guía de prevención de riesgos en los trabajos de soldadura. Angelma, S.A. (2009)

CSIC. Recomendaciones de normas de seguridad en soldadura.

## PÁGINAS WEB

<http://www.eii.uva.es/metalo/>

## NORMATIVA

Sección IX Código ASME.

- Parte QW Artículo I
  - Requerimientos generales de soldeo
- Parte QW Artículo II
  - Procedimiento Soldeo
  - Explicación de formatos de especificaciones soldeo (W.P.S.) y registros de cualificación de procedimiento (P.Q.R.).
- Parte QW Artículo III
  - Cualificación de soldadores
- Parte QW Artículo IV
  - Datos de soldeo

UNE 12464\_1. Normativa europea sobre iluminación para interiores



Elaboración del Procedimiento Escrito de Ejecución y  
Control de Calidad de una Unión Soldada de  
Virolas de Acero



UNE-EN ISO 6892-1. Materiales metálicos. Ensayo de tracción. Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente.

UNE EN ISO 15607 – Especificación y cualificación de los procedimientos de soldeo para los materiales metálicos. Reglas generales.

UNE EN ISO 15609-1 – Especificación y cualificación de procedimientos de soldeo para materiales metálicos. Especificación del procedimiento de soldeo. Parte 1: soldeo por arco.

UNE EN ISO 15613 - Especificación y cualificación de procedimientos de soldeo para materiales metálicos. Cualificación mediante pruebas de soldeo anteriores a la producción

UNE EN ISO 15614-1 - Especificación y cualificación de procedimientos de soldeo para materiales metálicos. Ensayo del procedimiento de soldeo. Parte 1: soldeo por arco y con gas de aceros y soldeo por arco del níquel y sus aleaciones.