



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

# ESTUDIO DE LA CORROSIÓN BAJO TENSIÓN DE LAMINACIÓN EN LA SOLDADURA TIG DE ACERO AISI 316L CON APORTE ER316L

Grado en Ingeniería Mecánica – Trabajo Final de Grado

**Alumno:**

Carlos López Greses

**Tutor:**

Manuel Pascual Guillamón

**Cotutor:**

Fidel Salas Vicente



# Índice

INDICE DE FIGURAS.....	3
INDICE DE TABLAS.....	4
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	4
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	4
CAPÍTULO 1- OBJETIVO.....	5
CAPÍTULO 2- INTRODUCCIÓN.....	6
CAPÍTULO 3- MATERIALES.....	7
3.1 Material y dimensiones.....	7
3.2 Material de aporte.....	7
CAPÍTULO 4 – UNIÓN DE LAS PIEZAS.....	8
4.1 Soldadura.....	8
4.2 Método de soldadura empleado.....	11
4.3 Procedimiento.....	12
4.4 Defectos en las soldaduras.....	14
4.5 Resultados.....	15
CAPÍTULO 5- CORTE DE PIEZAS Y OBTENCIÓN DE PROBETAS.....	18
5.1 Método de corte empleado y equipo.....	18
5.2 Dimensiones de las probetas.....	19
5.3 Procedimiento.....	20
CAPÍTULO 6- LAMINACIÓN DE PIEZAS.....	20
6.1 Laminación.....	20
6.2 Método de laminación y equipo.....	21
6.3 Dimensiones de laminación.....	21
6.4 Procedimiento.....	21
CAPÍTULO 7- ENSAYO DE TRACCIÓN.....	23
7.1 Método de ensayo empleado y equipo.....	24
7.2 Procedimiento.....	25
7.3 Resultados.....	25
CAPÍTULO 8- MICROGRAFÍA.....	32
8.1 Metalografía.....	32
8.2 Procedimiento.....	32
8.3 Observación microscópica.....	36

8.4 Resultados.....	37
CAPÍTULO 9- CORROSIÓN.....	43
9.1 Corrosión en los metales.....	43
9.2 Método empleado.....	45
9.3 Procedimiento.....	45
9.4 Resultados.....	49
CAPÍTULO 11 - CONCLUSIONES.....	52
CAPÍTULO 11 - PLIEGO DE CONDICIONES.....	54
11.1 Soldadura de chapas.....	54
11.2 Corte de piezas y obtención de probetas.....	54
11.3 Laminación de probetas.....	55
11.4 Ensayo de tracción.....	55
11.5 Micrografía.....	55
11.6 Ensayo por corrosión.....	56
CAPÍTULO 12 – PRESUPUESTO.....	57
12.1 Materiales.....	57
12.2 Mano de Obra.....	58
12.3 Materiales auxiliares.....	59
12.4 Resumen.....	60
CAPÍTULO 13 – BIBLIOGRAFÍA.....	61

## Índice de figuras

- Figura 1 – Dimensiones de las chapas de acero AISI 316L iniciales.
- Figura 2 – Composición de la varilla de aporte ER 316L.
- Figura 3 – Equipo básico de soldadura oxiacetilénica. [1]
- Figura 4 – Equipo básico de soldadura de electrodo revestido. [2]
- Figura 5 – Equipo básico de soldadura MIG/MAG. [3]
- Figura 6 – Equipo básico de soldadura TIG/GTAW. [4]
- Figura 7 - Esquema de soldadura por puntos
- Figura 8 – Amarre en V de las chapas a soldar.
- Figura 9 y 10 – Punteado de chapas a soldar.
- Figura 11 – Proceso de soldadura TIG, depositando el cordón de soldadura.
- Figura 12 – Defecto en la soldadura, Mordedura.
- Figura 14 – Defecto en la soldadura, Falta de penetración.
- Figura 15 – Cara A y B de la chapa soldada N°1.
- Figura 16 – Cara A y B de la chapa soldada N°2.
- Figura 17 – Cara A y B de la chapa soldada N°3.
- Figura 18 – Cara A y B de la chapa soldada N°4.
- Figura 19 – Cara A y B de la chapa soldada N°5.
- Figura 20 – Herramienta de corte por cizalladura.
- Figura 21 – Plano de corte de chapas a dimensiones de las probetas.
- Figura 22 – Esquema de laminación.
- Figura 23 y 24 – Laminadora de joyería Maquijoy modelo JD100.
- Figura 25 – Esquema de laminación.
- Figura 26 - Probetas de 1,5mm de espesor ensayadas a tracción.
- Figura 27 - Probetas de 1,25mm de espesor ensayadas a tracción.
- Figura 28 - Probetas de 1,00mm de espesor ensayadas a tracción.
- Figura 29 - Probetas de 0,75mm de espesor ensayadas a tracción.
- Figura 30 - Probetas de 0,65mm de espesor ensayadas a tracción.
- Figura 31- Zona y dimensiones de la probeta para estudiar a micrografía
- Figura 32 – Sierra de disco con accionamiento manual.
- Figura 33 y 34 – Máquina de embutición y compuesto termoendurecible
- Figura 35 – Desbastadora LaboPol 21
- Figura 36 – Ataque electroquímico en disolución de Ácido Oxálico al 20% y tensión de 12V y 1,2Amp.
- Figura 37 - Espesor 1,5 Sin Laminar -Metal base (x100)
- Figura 38 - Espesor 1,5 Sin Laminar – Transición (x100)
- Figura 39 - Espesor 1,5 Sin Laminar – Soldadura (x100)
- Figura 40 - Espesor 1,5mm laminado hasta 1,25mm – Metal base (x100)
- Figura 41 - Espesor 1,5mm laminado hasta 1,25mm – Transición (x100)
- Figura 42 - Espesor 1,5mm laminado hasta 1,25mm – Soldadura (x100)
- Figura 43 - Espesor 1,5mm laminado hasta 1,00mm – Metal Base(x100)
- Figura 44 - Espesor 1,5mm laminado hasta 1,00mm – Transición (x100)
- Figura 45 - Espesor 1,5mm laminado hasta 1,00mm – Soldadura (x100)
- Figura 46 - Espesor 1,5mm laminado hasta 0,75mm – Metal base (x100)
- Figura 47 - Espesor 1,5mm laminado hasta 0,75mm – Transición (x100)
- Figura 48 - Espesor 1,5mm laminado hasta 0,75mm – Soldadura (x100)
- Figura 49 - Espesor 1,5mm laminado hasta 0,65mm – Metal base (x100)
- Figura 50 - Espesor 1,5mm laminado hasta 0,65mm – Transición (x100)
- Figura 51 - 1,5mm laminado hasta 0,65mm – Soldadura (x100)

Figura 52 – Probetas antes de ensayar a corrosión

Figura 52 y 53 - Vertido de Cloruro de hierro sobre las probetas.

Figura 54 - Probetas AISI316L Sin Laminar 1,5mm tras corrosión húmeda FeCl<sub>3</sub>.

Figura 55 - Probetas AISI316L Laminadas hasta 1,25mm tras corrosión húmeda FeCl<sub>3</sub>

Figura 56 - Probetas AISI316L Laminadas hasta 1,00mm tras corrosión húmeda FeCl<sub>3</sub>

Figura 57 - Probetas AISI316L Laminadas hasta 0,75mm tras corrosión húmeda FeCl<sub>3</sub>

Figura 58 - Probetas AISI316L Laminadas hasta 0,65mm tras corrosión húmeda FeCl<sub>3</sub>

### *Índice de Tablas*

Tabla 1 - Resultados del ensayo para espesor =1,5mm

Tabla 2 - Resultados del ensayo para espesor =1,25mm

Tabla 3 - Resultados del ensayo para espesor =1,00mm

Tabla 4 - Resultados del ensayo para espesor =0,75mm

Tabla 5 - Resultados del ensayo para espesor =0,65mm

Tabla 6 - Resultados del ensayo por corrosión por diferencia de masa.

### *Índice de Gráficos*

Gráfico 1 – Tensión vs deformación para probetas de espesor= 1,5mm

Gráfico 2 – Tensión vs deformación para probetas de espesor= 1,25mm

Gráfico 3 – Tensión vs deformación para probetas de espesor= 1,00mm

Gráfico 4 – Tensión vs deformación para probetas de espesor= 0,75mm

Gráfico 5 – Tensión vs deformación para probetas de espesor= 0,65mm

Gráfico 6 – Tensión vs Porcentaje de deformación

Gráfico 7 – Pérdida de peso unitaria vs Tensión

Gráfico 7 – Pérdida de peso unitaria vs Tensión

### *Índice de Ecuaciones*

Ecuación. 1 – Cálculo de la deformación longitudinal de una probeta.

Ecuación. 2 – Cálculo de la tensión de rotura

Ecuación. 3 – Cálculo del Módulo de Young

## Capítulo 1: Objetivo

El presente trabajo final de grado tiene como objetivo estudiar los cambios en las propiedades mecánicas y en la susceptibilidad a la corrosión por picaduras en el acero inoxidable AISI 316L soldado con varilla de aporte AISI316L cuando se comete a la chapa a un proceso de deformación plástica en frío por la laminación a distintos espesores.

Estudiaremos como este acero inoxidable es corroído por ambiente salinos en función de las tensiones residuales acumuladas durante el proceso de laminación y soldadura.

Para ello, soldaremos chapas metálicas de dicho acero mediante soldadura de tipo TIG (Tungsten Inert Gas) o también conocido como GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) en una atmósfera protectora de gas Argón, que posteriormente laminaremos a distintos espesores y sumergiremos en cloruro férrico para estudiar la corrosión por picaduras y recreando dichos ambientes salinos.

En el presente proyecto, se llevarán a cabo estudios en la zona de la soldadura, que definirán las características mecánicas y a corrosión del acero mediante un estudio a tracción, corrosión y micrografía. Se observará su evolución durante el proceso de laminación en frío.

Las características mecánicas de las soldaduras se ensayarán mediante ensayos destructivos de tracción, con el objetivo de determinar la transformación de las características mecánicas que sufre a consecuencia de la laminación y trazaremos las gráficas de tensión - deformación correspondientes.

## Capítulo 2: Introducción

El acero inoxidable es aquel acero que contiene como mínimo 10,5% de cromo en masa, en algunos casos, aleados con otros elementos como carbono, silicio, molibdeno y níquel para mejorar sus características tanto mecánicas como frente a la corrosión.

A diferencia del acero ordinario que cuando queda expuesto a los elementos, se oxida y forma óxido de hierro en su superficie y que si no se combate puede permitir que la oxidación siga adelante hasta que el acero esté completamente corroído.

Los aceros inoxidables también se oxidan, pero en vez de óxido común, lo que se forma en la superficie es una tenue película de óxido de cromo que constituye una coraza contra los ataques de la corrosión. Si se elimina esta película de óxido de cromo que recubre los aceros inoxidables, se vuelve a formar inmediatamente al combinarse el cromo con el oxígeno de la atmósfera ambiente.

El acero inoxidable, es probablemente el material más utilizado en la actualidad para la construcción de elementos que requieren de resistencia a la corrosión, además que durante muchos años fue el único material que contara con esta característica.

Para esta investigación, nos enfocaremos en los Aceros Inoxidables austeníticos, que son los que pertenecen a la serie 300 de la norma AISI (American Iron Steel Institute), en concreto en el acero inoxidable AISI316L..

El acero inoxidable del Tipo 316L es una versión de carbón extra bajo del Tipo 316 que minimiza la precipitación de carburos de cromo.

Esto le brinda unas cualidades de resistencia a la corrosión significativas, pero éstas se ven afectadas cuando se les somete a condiciones de alta salinidad y de tensión, como estudiaremos en este proyecto. Para ello, recrearemos las condiciones de alta salinidad sumergiendo las chapas soldadas y posteriormente laminadas en cloruro férrico  $FeCl_3$  y estudiaremos el impacto del proceso de corrosión por el método de pérdida de masa.

Las aplicaciones más destacadas de este acero podría ser su uso en la industria alimentaria o química ya que al ser resistente a la corrosión es una opción fiable y segura o en maquinaria marítima en contacto con el agua del mar.

Otra de sus aplicaciones es en el campo quirúrgico donde puede emplearse para estabilizar estructuras óseas ya que puede estar en contacto continuo con medios fisiológicos con alta índice de salinidad.

## Capítulo 3: Materiales

### 3.1 Material y dimensiones de las chapas

Partiremos de dos chapas metálicas de acero inoxidable AISI316L previamente laminado en frío de espesor de 1,5 mm y cortados mediante cizalla a dimensiones de 80x160mm.

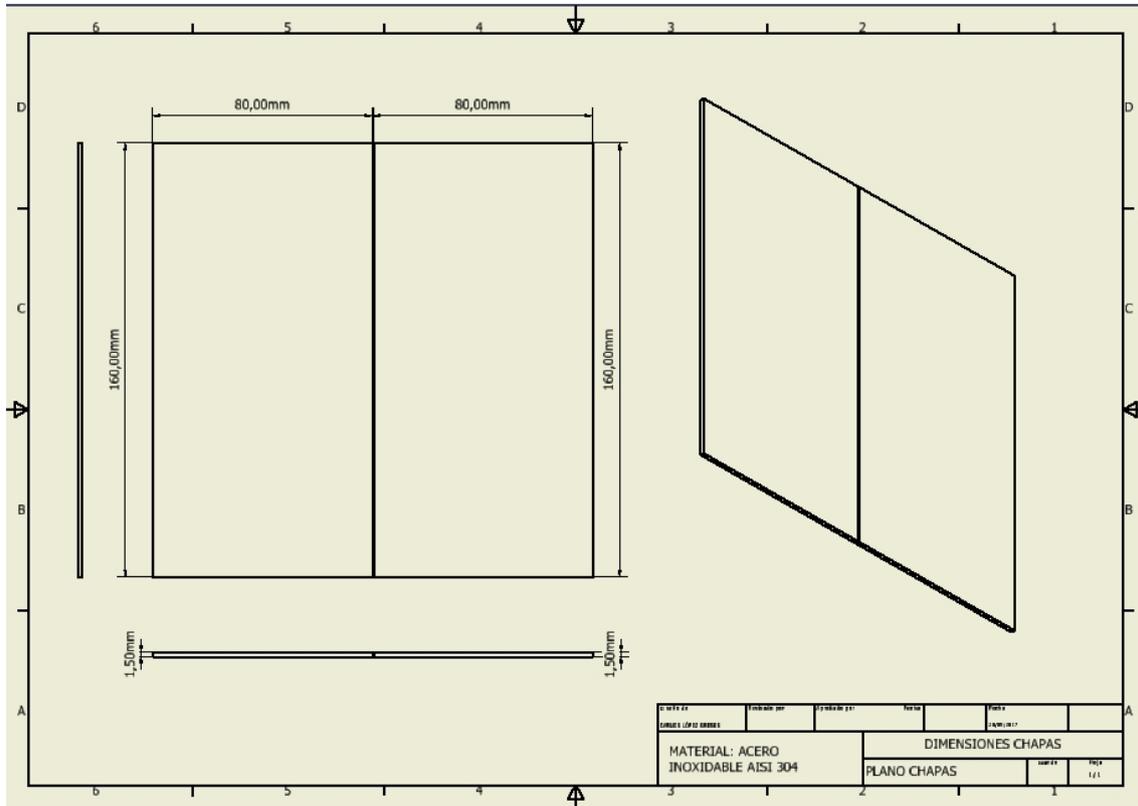


Figura 1 – Dimensiones de las chapas de acero AISI 316L iniciales.

### 3.2 Material de Aporte

El material que emplearemos como aporte para la soldadura será varilla de acero inoxidable 316L de diámetro y longitud 1/16" x 36" (1.6 x 900mm), ya que es un material de aporte indicado para soldar aceros inoxidables expuestos a altos niveles de corrosión.



Composición del acero inoxidable 304-304L-316-316L								
AISI	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	C	P	S
304	16.00-18.00	8.00-10.00	-	2.00	0.75	0,08	0.045	0.030
304L	16.00-18.00	8.00-13.00	-	2.00	0.75	0,035	0.045	0.030
316	16.00-18.00	10.00-14.00	2.00-3.00	2.00	0.75	0,08	0.045	0.030
316L	16.00-18.00	10.00-15.00	2.00-3.00	2.00	0.75	0,035	0.045	0.030

Figura 2 – Composición de la varilla de aporte ER 316L. [1]

## Capítulo 4: Unión de las piezas

### 4.1 Soldadura:

La soldadura es un proceso de unión de dos o más piezas, generalmente metálicas, logrado a través de la fusión de ambos materiales. A esta fusión se le puede agregar un material de aporte, que al fundirse crea un nexo de unión entre las piezas. Existen varios tipos de soldadura, siendo los más comunes:

#### Soldadura Oxiacetilénica

Es un proceso de soldadura por fusión donde se emplea el calor generado por la combustión del gas acetileno ( $C_2H_4$ ) como combustible con el oxígeno ( $O_2$ ) como comburente. Mediante un soplete, ambos gases se mezclan para su posterior combustión generando el calor suficiente para alcanzar la temperatura de fusión de los materiales a soldar.

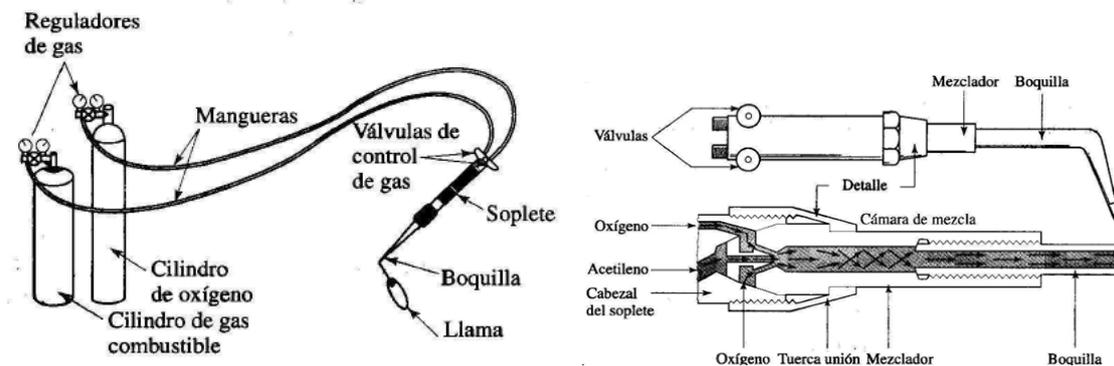


Figura 3 – Equipo básico de soldadura oxiacetilénica. [2]

#### Soldadura de Electrodo Revestido

En la soldadura por electrodo, el intenso calor necesario para llevar a temperatura de fusión los materiales a soldar es conseguido a través de un arco eléctrico creado a partir de una diferencia de potencial entre el electrodo y la pieza a soldar. La chispa que genera la diferencia de potencial ioniza el aire circundante, permitiendo de esta manera el paso de corriente a través del aire. Esta corriente genera una concentración de calor muy elevada en una zona muy delimitada, permitiendo así la fusión de los materiales a soldar y del propio electrodo revestido que actuara como material de aporte y recubrimiento.

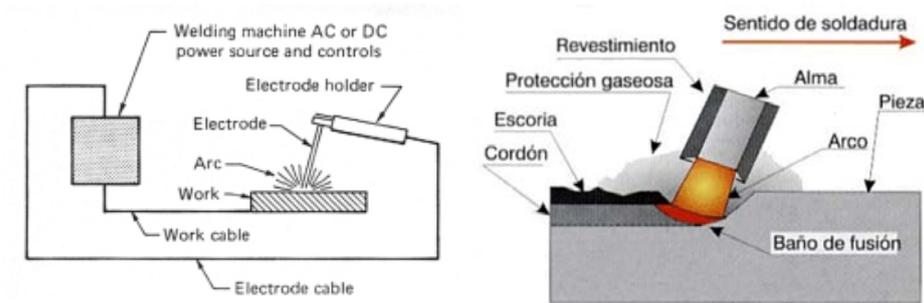


Figura 4 – Equipo básico de soldadura de electrodo revestido. [3]

La característica más importante de la soldadura con electrodos revestidos, es que el arco eléctrico se produce entre la pieza y un electrodo metálico recubierto que hará la función de conducir la electricidad y a su vez como material de aporte para la soldadura. El recubrimiento protege el interior del electrodo hasta el momento de la fusión. Con el calor del arco, el extremo del electrodo se funde y se quema el recubrimiento, de modo que se obtiene la atmósfera adecuada para que se produzca la transferencia de metal fundido desde el núcleo del electrodo hasta el baño de fusión en el material base. Estas gotas de metal fundido caen recubiertas de escoria fundida procedente de la fusión del recubrimiento del arco. La escoria flota en la superficie y forma, por encima del cordón de soldadura, una capa protectora del metal fundido.

### Soldadura MIG/MAG

La soldadura de tipo MIG/MAG corresponde a las iniciales de Metal Inert Gas o Metal Active Gas dependiendo del gas que se emplee como recubrimiento.

Es un proceso de soldadura por arco eléctrico donde a diferencia de la soldadura por electrodo revestido, el aporte de material se alimenta a través de un hilo consumible continuo, quedando éste protegido de la atmósfera circundante por un gas inerte en el caso del MIG o por un gas activo en el caso de MAG. Es un sistema más productivo que el de soldadura por electrodo revestido por no tener que estar cambiando el electrodo continuamente, además de poder regular la cantidad de aporte de hilo.

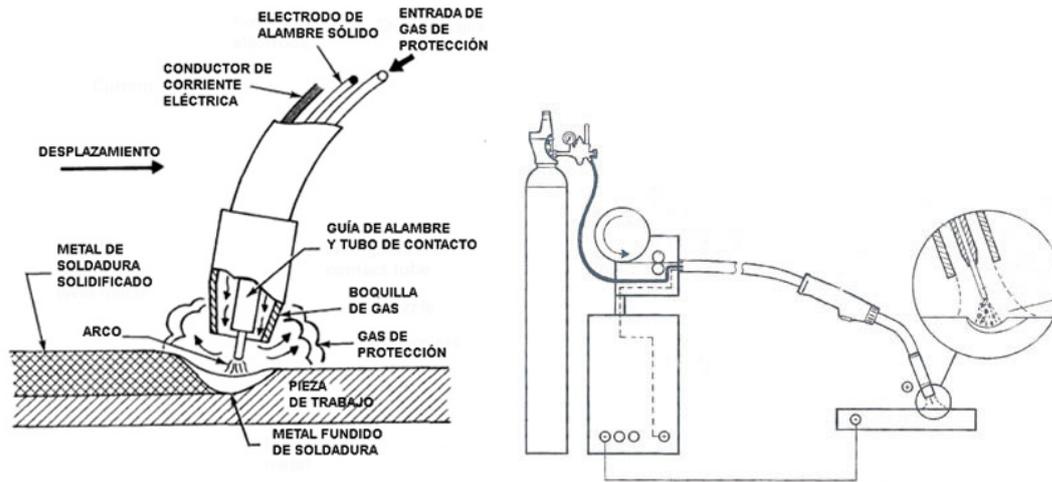


Figura 5 – Equipo básico de soldadura MIG/MAG. [4]

### Soldadura TIG

La soldadura TIG corresponde a las iniciales Tungsten Inert Gas. Este proceso utiliza un arco eléctrico como fuente de energía que se establece entre la punta del electrodo, en este caso no consumible, de tungsteno y la pieza a soldar. Ésta está envuelta en una atmósfera protectora de gas, Argón o Helio, que emana de la boquilla de la antorcha. La tasa de deposición es menor que la de otros procesos ya que el material de aporte se alimenta manualmente. Este proceso está indicado para trabajos que requieran mayor calidad y limpieza.

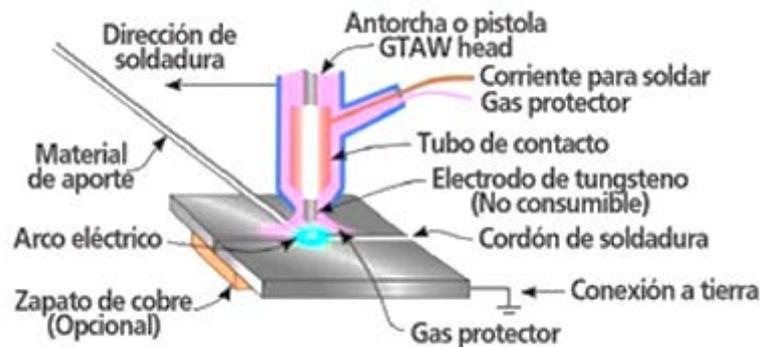


Figura 6 – Equipo básico de soldadura TIG/GTAW. [5]

## Soldadura por puntos

La soldadura por puntos es un método en el que, mediante unos electrodos no consumibles, se calientan los materiales a soldar hasta llegar a temperatura de fusión y, a su vez, se realiza una presión entre ambas piezas a soldar, generalmente chapas para unir las. Este método es uno de los más rápidos y limpios, pero en cambio no hay posibilidad de añadir material de aportación.

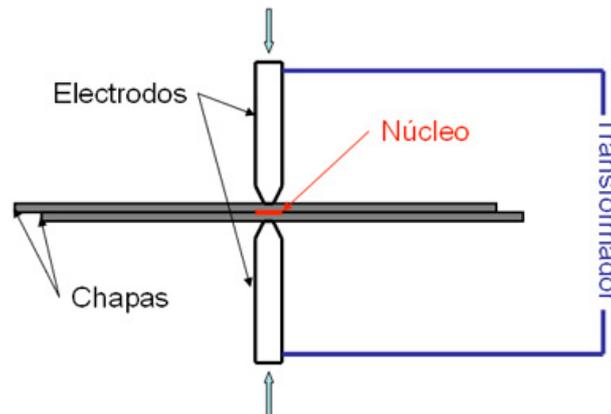


Figura 7 - Esquema de soldadura por puntos [6]

### 4.2 Método de soldadura empleado y equipo

En nuestro proyecto emplearemos soldadura TIG dadas sus características de precisión y calidad en la soldadura.

La gran ventaja de este método de soldadura es, básicamente, la obtención de cordones más resistentes, más dúctiles y menos sensibles a la corrosión que en el resto de procedimientos ya que el gas protector impide el contacto entre el oxígeno de la atmósfera y el baño de fusión.

El equipo que utilizaremos un SOLDADOR INVERTER MARCA TIGMG TM 170 con un electrodo de Tungsteno y un recubrimiento de gas Argón.

Como medidas de seguridad, emplearemos una máscara de protección automática de factor 9 contra las radiaciones emitidas durante el proceso de soldadura.

### 4.3 Procedimiento

#### Preparación de las piezas

Como en cualquier proceso de soldadura, es extremadamente importante limpiar las piezas a soldar con el fin de evitar la presencia de grasas, aceites y óxidos que constituyen una fuente de contaminación del baño de fusión. De esta manera garantiremos un resultado óptimo en nuestra soldadura y evitaremos la formación de poros o defectos en la soldadura a consecuencia de la contaminación.

Para ello utilizaremos un disolvente universal con el cual limpiaremos las chapas y en concreto, los cantos donde realizaremos la soldadura.

#### Amarrar y Puntear piezas

Para conseguir una buena penetración de la soldadura, colocaremos las chapas superpuestas encima de otras chapas para crear un pequeño espacio entre ellas y la mesa, de esta manera, el baño de fusión podrá descolgar adecuadamente.

Éstas estarán amarradas al banco de trabajo con unos sargentos metálicos para evitar que se muevan y se deformen lo mínimo posible.



Figura 8 – Amarre en V de las chapas a soldar.

Conociendo las deformaciones que se llevan a cabo al someter a los materiales al calor de la soldadura, jugaremos con ellas a nuestro favor colocando las chapas con un ligero 3ngulo respecto al eje central de manera que cuando apliquemos los puntos de soldadura en el extremo m3s cerrado, el propio calor nos ir3 cerrando el 3ngulo consiguiendo un buen paralelismo entre las chapas para posteriormente soldar el cord3n.



Figura 9 y 10 – Punteado de chapas a soldar.

### Cord3n

Una vez punteado el largo de las chapas, iremos soldando con ayuda de la varilla de aporte el cord3n. Este deber3 tener suficiente material de aporte y penetraci3n para que las chapas queden unidas sin perder espesor.

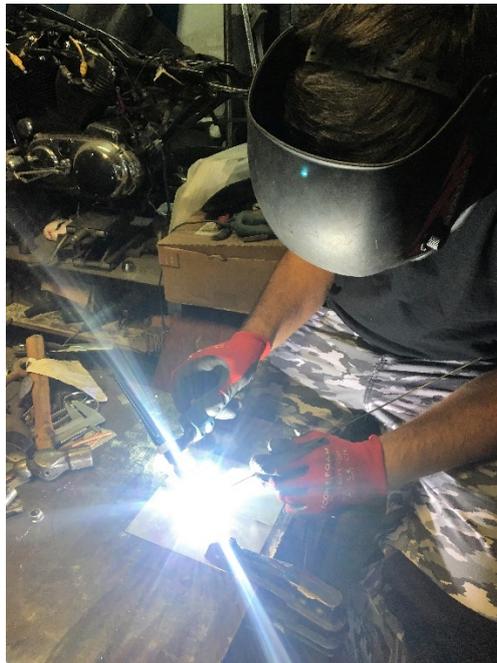


Figura 11 – Proceso de soldadura TIG, depositando el cord3n de soldadura.

Cabe destacar, que la deposici3n del cord3n de soldadura es uno de las partes m3s importantes ya que si no tiene un espesor uniforme, la compresi3n que ejercen los rodillos

de laminación no será la misma en todas las zonas del largo de la pieza, haciendo que la pieza no deforme de forma uniforme y creando zonas de diferentes tensiones.

## Acabado

Para garantizar un espesor uniforme de las chapas, desbastaremos el material de aporte sobrante con una amoladora angular con un disco de desbaste tipo milhojas en ambas caras del cordón, con cuidado de no desbastar en exceso para no reducir el espesor de la chapa y tampoco dejar zonas con espesor mayor de 1,5mm.

### 4.4 Defectos en la soldadura

En todo proceso de soldadura, existe la posibilidad de que se lleven a cabo diferentes problemas, los más comunes son los que se enumeran a continuación. Los que se ilustran con fotografías son los que han aparecido durante la ejecución del proceso de soldadura del presente proyecto.

#### Mordeduras

La mordedura es un defecto que se presenta en forma de surco de longitud variable en cualquiera de los bordes de un cordón. Esta falta de metal puede aparecer a causa de usar una intensidad excesiva, una posición incorrecta del ángulo de la lanza o por una velocidad de desplazamiento demasiado elevada.

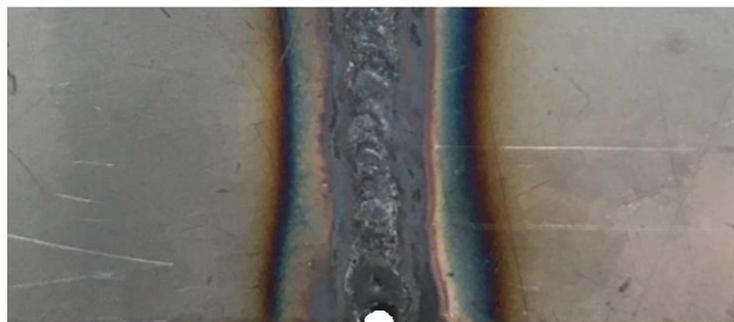


Figura 12 – Defecto en la soldadura, Mordedura.

#### Porosidad

La porosidad es la contaminación del metal de soldadura de un gas atrapado que se manifiesta en forma de burbuja en el cordón de soldadura. Los gases de protección o gases emitidos como resultado de la aplicación de la antorcha al metal tratado son absorbidos en el metal fundido y emitidos cuando ocurre la solidificación.

## Mala Fusión

Este es uno de los defectos internos más serios que puede haber en una soldadura. Se produce cuando el electrodo o material de aportación fundido cae sobre el material base sin haber conseguido un baño de fusión previo correcto. Puede ocurrir por que la soldadura no se realice con la intensidad de corriente adecuada o que el operario no sostenga la lanza en el ángulo adecuado.

## Falta de penetración

Tal como se muestra en la siguiente figura, la falta de penetración se presenta cuando el baño de fusión y el material de aporte no descuelgan lo suficiente por la parte de debajo de las chapas, creando un nexo de unión insuficiente entre ambas.

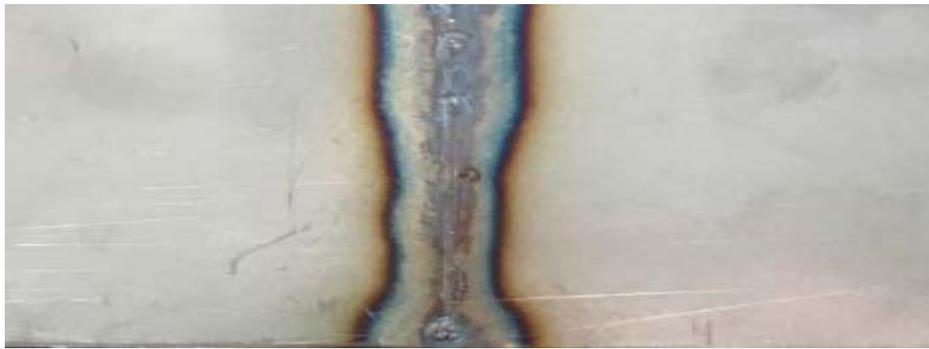


Figura 13 – Defecto en la soldadura, Falta de penetración.

## Falta de gas

La falta de gas de recubrimiento en la soldadura aparece en forma de contaminación del cordón debido al contacto del oxígeno en el baño de fusión.

### 4.5 Resultados

A continuación se muestran las imágenes de las chapas soldadas de acero inoxidable AISI316L con varilla de aporte de acero inoxidable AISI316L con recubrimiento de gas Argón:



Figura 15 – Cara A y B de la chapa soldada N°1.



Figura 16 – Cara A y B de la chapa soldada N°2.



Figura 17 – Cara A y B de la chapa soldada N°3.



Figura 18 – Cara A y B de la chapa soldada Nº4.



Figura 19 – Cara A y B de la chapa soldada Nº5.

Pese a la dificultad de esta técnica de soldadura, en general todas las chapas han quedado bien soldadas sin ningún defecto aparente y con muy poca deformación a consecuencia del calor.

Antes de proceder al siguiente paso de corte de piezas y obtención de probetas, nos aseguraremos de que todos los cordones estén correctamente soldados. Para ello, taparemos aportando más material de aporte si es necesario cualquier indicio de falta de penetración, poro o mordedura y posteriormente volveremos a desbastar si el espesor lo requiere con el fin de garantizar la uniformidad y homogeneidad de las probetas que obtendremos a partir de estas chapas.

## Capítulo 5: Corte de piezas y Obtención de Probetas

Con el fin de realizar el estudio de la corrosión frente a tensión y el estudio de micrografía, obtendremos probetas a partir de las chapas soldadas.

### *5.1 Método de corte empleado y equipo*

Con el fin de garantizar un corte uniforme de las probetas, emplearemos el corte por cizalladura. Este método garantiza un acabado admisible sin rebabas significantes.

Para ello fijaremos la cizalla con ayuda de un tornillo de banco para tener un buen acceso y poder maniobrar la palanca de corte con comodidad y seguridad.



Figura 20 – Herramienta de corte por cizalladura.

### *5.2 Dimensiones de las probetas*

Para conseguir las probetas a partir de las chapas soldadas, cortaremos cada chapa en varias piezas. Obtendremos de cada chapa, 7 probetas de 20mm de ancho para ensayar a tracción y corrosión y 2 probetas de 10mm de ancho de los bordes de las chapas para estudiar con micrografía.

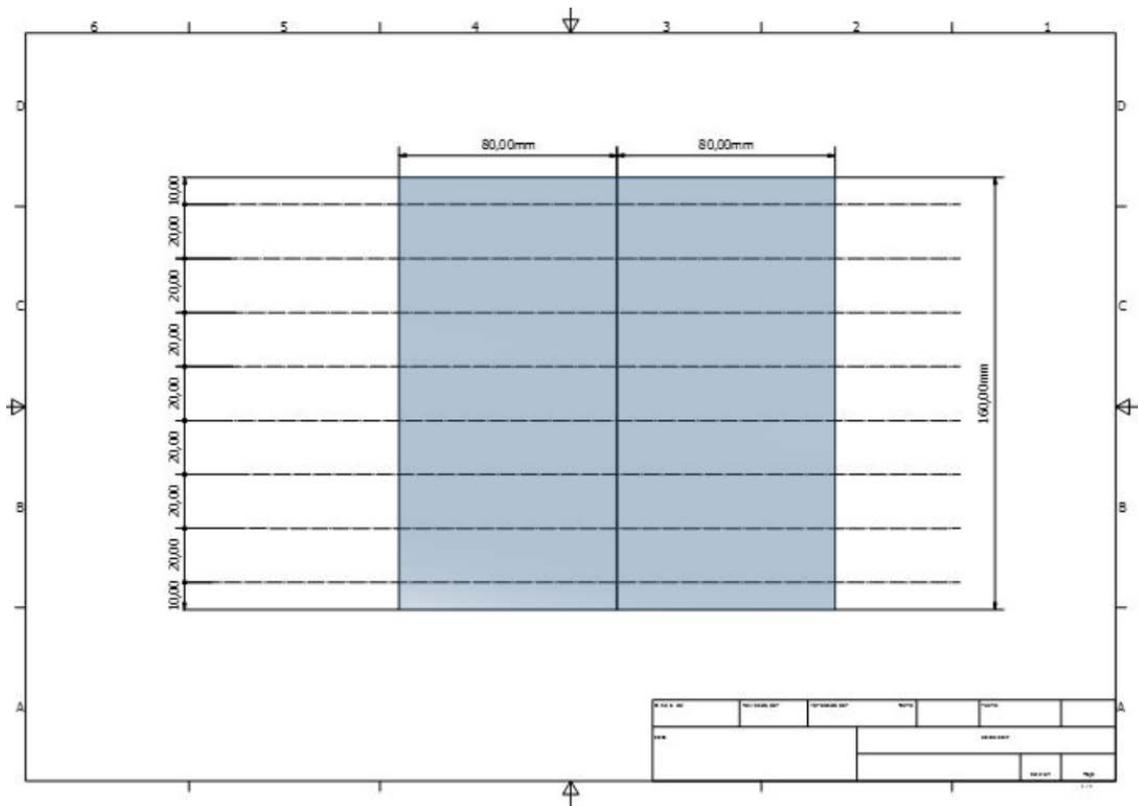


Figura 21 – Plano de corte de chapas a dimensiones de las probetas.

### 5.3 Procedimiento

Introduciremos las chapas en la cizalla e iremos cortando a las dimensiones correspondientes. Una vez cortadas las probetas, las separaremos de la manera que muestra la figura 25.

Para trabajar de manera segura, utilizaremos gafas de seguridad y guantes de seguridad, una vez cortadas, marcaremos con rotulador indeleble para no confundirlas.

Obtendremos un total de ocho probetas de las cuales seis serán de dimensiones 20x160mm que serán las que ensayaremos a tracción y a corrosión. Por otra parte, obtendremos 2 probetas de 10x160mm de las cuales una será estudiada a micrografía y la probeta restante será reservada.

## Capítulo 6: Laminación de piezas

### 6.1 Laminación

El laminado es el proceso de deformación volumétrica que tiene como objetivo reducir el espesor inicial del metal mediante fuerzas de compresión que ejercen los rodillos sobre las piezas a laminar.

En la laminadora, los rodillos giran en sentidos opuestos con el fin de traccionar las chapas hacia los rodillos y por tanto reducir el espesor de salida con respecto al de entrada, estos pueden tener diferentes formas para poder aportarle una forma diferente a la chapa cuando sale del tren de laminación.

Se puede llevar a cabo en caliente (laminado en caliente) o en frío (laminado en frío). Las principales diferencias es que el laminado en caliente el material cebado a los rodillos está a una temperatura por encima de la temperatura de recristalización, por lo tanto, el material es mucho más maleable, puede ser moldeado con facilidad y no adquiere tensiones residuales. Mientras que, en el laminado en frío, el material a laminar no tiene ningún tratamiento térmico previo, esto crea mayores tensiones en el material cuando es comprimido por los rodillos, además de que el grano queda deformado.

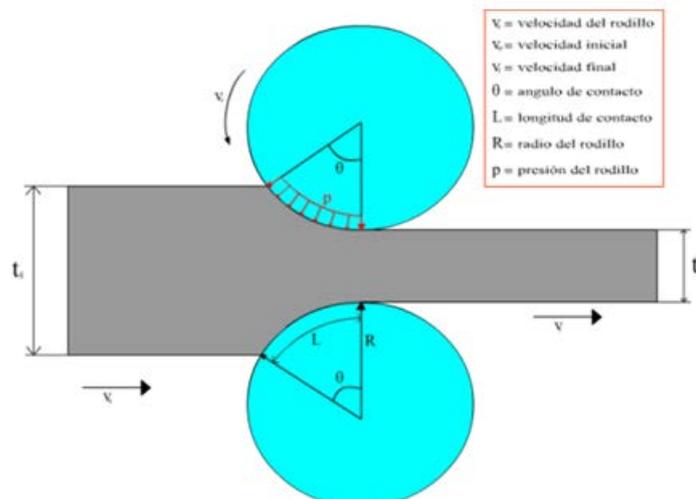


Figura 22 – Esquema de laminación. [7]

## 6.2 Método de laminación empleado y equipo

En nuestro proyecto, emplearemos la laminación en frío con rodillos cilíndricos. La laminadora es una laminadora de joyería de la marca Maquijoy, Modelo JD100.



Figura 23 y 24 – Laminadora de joyería Maquijoy modelo JD100.

## 6.3 Dimensiones de laminación

Las probetas que habíamos obtenido cortando las chapas por cizalla, serán laminadas mediante laminación en frío según el esquema de la Figura 25.

## 6.4 Procedimiento

Sabiendo que la distancia entre los rodillos de la laminadora aumenta o disminuye 0,05mm por cada cuatro dientes en los engranajes de regulación, iremos disminuyendo progresivamente el espesor de las probetas hasta llegar a las dimensiones deseadas:

- 1,5mm: Sin laminar
- 1,25mm: Laminada en 5 etapas de 2 pasadas, total = 10 pasadas/probeta.
- 1,0mm: Laminada en 10 etapas de 2 pasadas, total = 20 pasadas/probeta.
- 0,75mm: Laminada en 20 etapas de 2 pasadas, total=30 pasadas/probeta.
- 0,65mm: Laminada en 34 etapas de 2 pasadas, total=34 pasadas/probeta.

Una vez laminadas todas las probetas, deberemos volver a cortar a dimensiones adecuadas, puesto que al laminarse la dimensión longitudinal de las probetas aumenta a medida que reducimos su espesor. Concretamente a 80mm de longitud las probetas destinadas a tracción y micrografía y a 40mm de longitud las destinadas a corrosión.

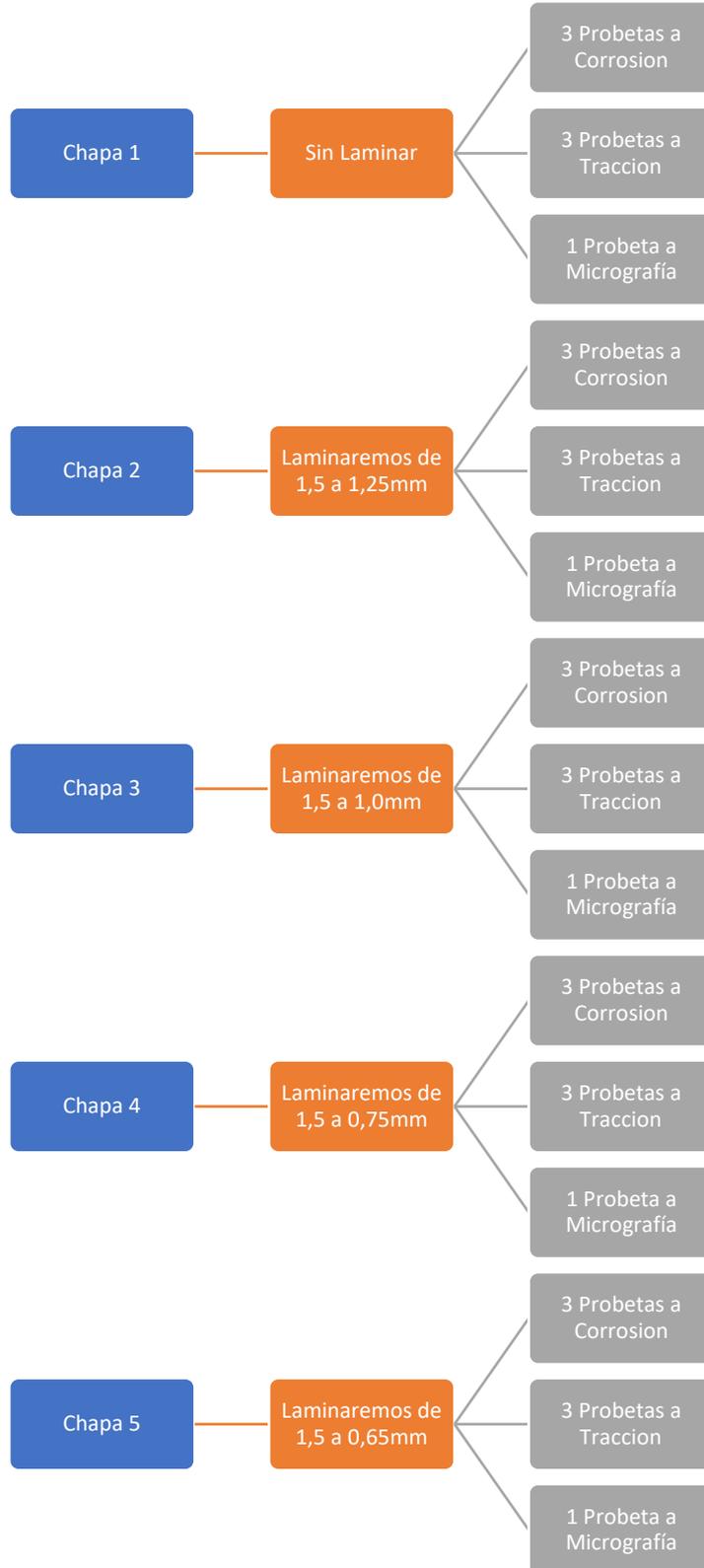


Figura 25 – Esquema de laminación.

## Capítulo 7: Ensayo a tracción

El ensayo a tracción tiene como principal objetivo caracterizar las propiedades mecánicas de un metal.

Este tipo de ensayo es de tipo destructivo, donde se somete a una probeta metálica a esfuerzos de tracción o deformación crecientes hasta conseguir su rotura, midiéndose en todo momento la carga aplicada y el alargamiento que sufre la probeta, obteniéndose resultados en una curva de tensión deformación.

### Elongación en %

La propiedad mecánica que permite a un material deformarse es la ductilidad, esta es capaz de determinar cuan maleable es un material y cuanto pueden deformarse plásticamente bajo la acción de una fuerza de manera sostenible sin romperse.

En otros términos, un material presenta una gran ductilidad cuando su relación entre el alargamiento longitudinal y la disminución de la sección transversal es elevada.

$$\% \text{ de elongación} = \frac{L_f - L_o}{L_o} \times 100$$

Ecuación 1 – Cálculo de la deformación longitudinal de una probeta.

Donde  $L_f$  es la longitud de la probeta tras haber sido sometida a los esfuerzos de deformación y  $L_o$  es la longitud de la probeta inicial.

En caso contrario, un material que presenta dificultad para elongar y que sufre poca o ninguna deformación plástica se denomina frágil.

### Tensión de rotura

Se denomina tensión de rotura a la máxima tensión que un material puede soportar bajo tensión antes de que su sección transversal se contraiga hasta romperse.

La tensión de rotura se obtiene por lo general realizando un ensayo de tracción y registrando la tensión frente a la deformación donde el punto más elevado de la curva tensión-deformación es la tensión de rotura. Esta viene determinada por la siguiente ecuación:

$$\sigma_r = \frac{F_r}{A}$$

Ecuación. 2 – Cálculo de la tensión de rotura

Donde  $F_r$  es la carga máxima que soporta la probeta,  $A$  corresponde al área inicial de la sección transversal de la probeta estudiada y  $\sigma_r$  equivale a la tensión de rotura del material.

## Módulo de Young

El módulo de Young o módulo de la elasticidad es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, tiene el mismo valor para una tracción que para una compresión, siendo una constante independiente del esfuerzo siempre que no exceda de un valor máximo denominado límite elástico, y es siempre mayor que cero. Podemos obtener el módulo de Young en un gráfico siendo la pendiente del segmento lineal de la curva tensión – deformación o mediante la siguiente fórmula.

$$E = \frac{F_e \cdot l_0}{\Delta l \cdot A}$$

Ecuación 3 – Cálculo del Módulo de Young

Siendo  $F_e$  la carga elástica,  $l_0$  la longitud inicial de la probeta ensayada,  $\Delta l$  la diferencia entre las longitudes y  $A$  la sección de la probeta. Las unidades del módulo de Young en el sistema internacional son Pascales.

### *7.1 Método de ensayo empleado y equipo*

Para ello, utilizaremos una máquina de ensayos que consta de 2 cabezales, ambos con mordazas que amarran la pieza. Uno de estos cabezales es fijo, mientras que el otro es móvil, esto permite medir el desplazamiento del cabezal móvil a una velocidad seleccionable.

La máquina que emplearemos es una maquina universal de ensayos Instron 4200 con una célula de carga de 50kN.

### *Procedimiento*

Una vez cortadas las probetas previamente laminadas a las dimensiones necesarias (80mm de longitud), se procederá a montar cada probeta en la máquina para ensayar individualmente su resistencia a tracción.



Figura 25 – Máquina de ensayo a tracción Instron 4200, célula de carga de 50kN y ordenador de obtención de resultados

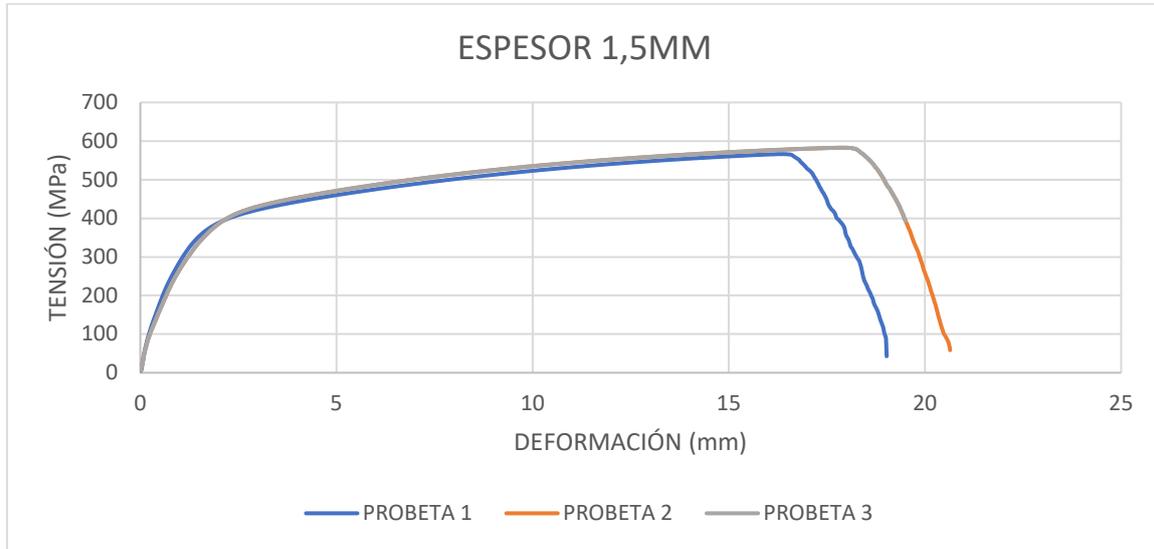
Una vez hayamos introducido los datos en el ordenador de sección, espesor y dimension de la probeta que vayamos a ensayar, el cabezal móvil de la máquina empezará a desplazarse a una velocidad de avance de 10mm/min, ejerciendo en cada momento la fuerza necesaria para mantener dicha velocidad de deformación. Los valores de fuerza aplicada y deformación serán registrados a una frecuencia de 10 puntos por segundo.

### *Resultados*

A continuación, se muestran las distintas gráficas obtenidas de los resultados obtenidos en los ensayos de tracción llevados a cabo y después de haber convertido las unidades al sistema internacional puesto que la maquina arroja los resultados en sistema anglosajón.

## Acero inoxidable AISI316L + Varilla AISI 316L + Recubrimiento Argón

Espesor 1,5 sin laminar



ESPESOR 1,5	SECCIÓN(MM <sup>2</sup> )	LE (MPa)	$\sigma_{MAX}$ (MPa)
1	30	350,77	566,211
2	30	393,28	575,834
3	30	374,094	559,939
<b>MEDIA</b>		<b>372,7146667</b>	<b>567,328</b>

Tabla 1 : Resultados del ensayo para espesor =1,5mm



Podemos observar que las probetas rompen por la zona del material base o por la zona del cordón de soldadura indistintamente, por lo que la soldadura es igual de fuerte que el propio material base. Apreciamos un periodo plástico muy grande con respecto al resto de probetas.

Figura 26 - Probetas de 1,5mm de espesor ensayadas a tracción.

Acero inoxidable AISI316L + Varilla AISI 316L + Recubrimiento Argón

Espesor 1,5 Laminado hasta 1,25mm

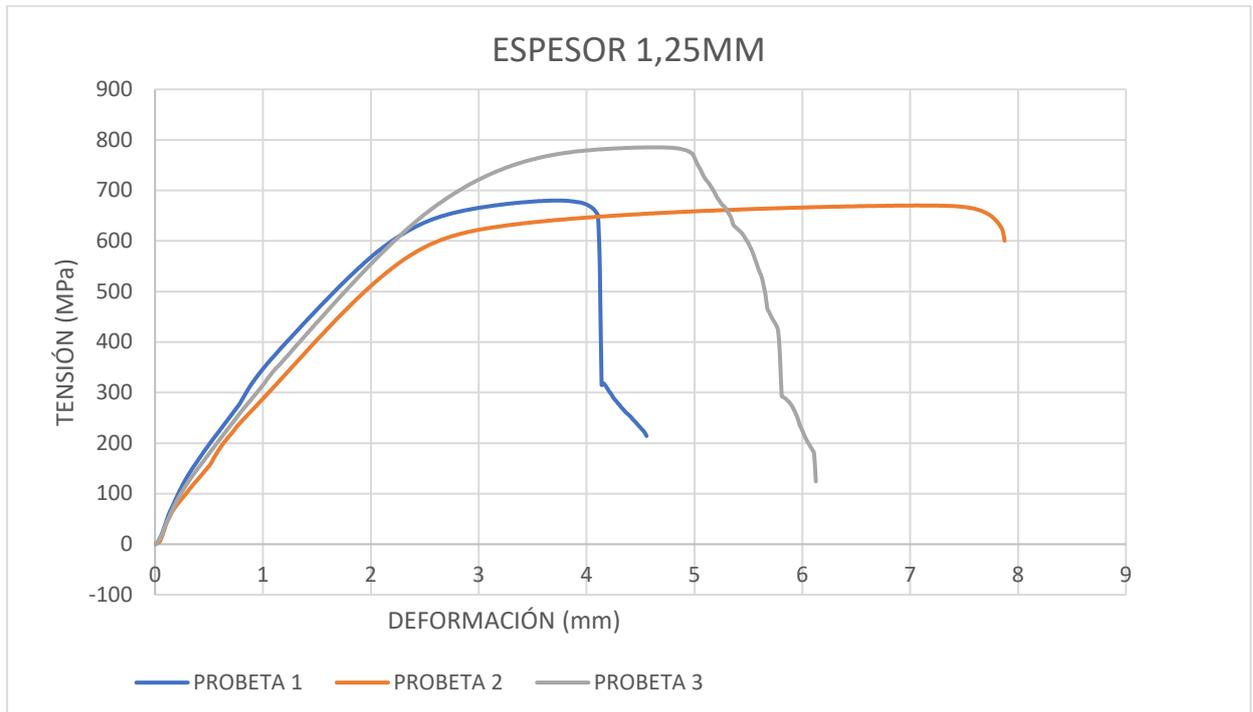


Gráfico 2 – Tensión vs deformación para probetas de espesor= 1,25mm

ESPESOR 1,25	SECCIÓN(MM <sup>2</sup> )	LE (MPa)	$\sigma_{MAX}$ (MPa)
1	25	568,854	679,987
2	25	555,971	669,525
3	25	718,651	783,345
<b>MEDIA</b>		<b>614,492</b>	<b>710,9523333</b>

Tabla 2 : Resultados del ensayo para espesor =1,25mm

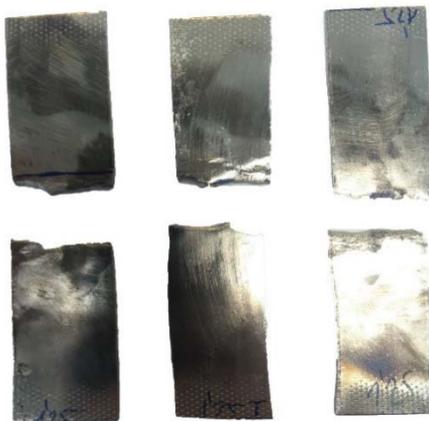


Figura 27 – Probetas de 1,25mm de espesor ensayadas a tracción.

En el ensayo a este espesor, encontramos una importante disminución en la ductilidad del material, con respecto al espesor anterior. Esta zona plástica describe diferentes comportamientos en cada una de las probetas, pero ninguno de los alargamientos llega a la mitad de la deformación del espesor inicial. Apreciamos que la carga de rotura aumenta ligeramente y el límite elástico aumenta significativamente.

Acero inoxidable AISI316L + Varilla AISI 316L + Recubrimiento Argón

Espesor 1,5 Laminado hasta 1,00mm

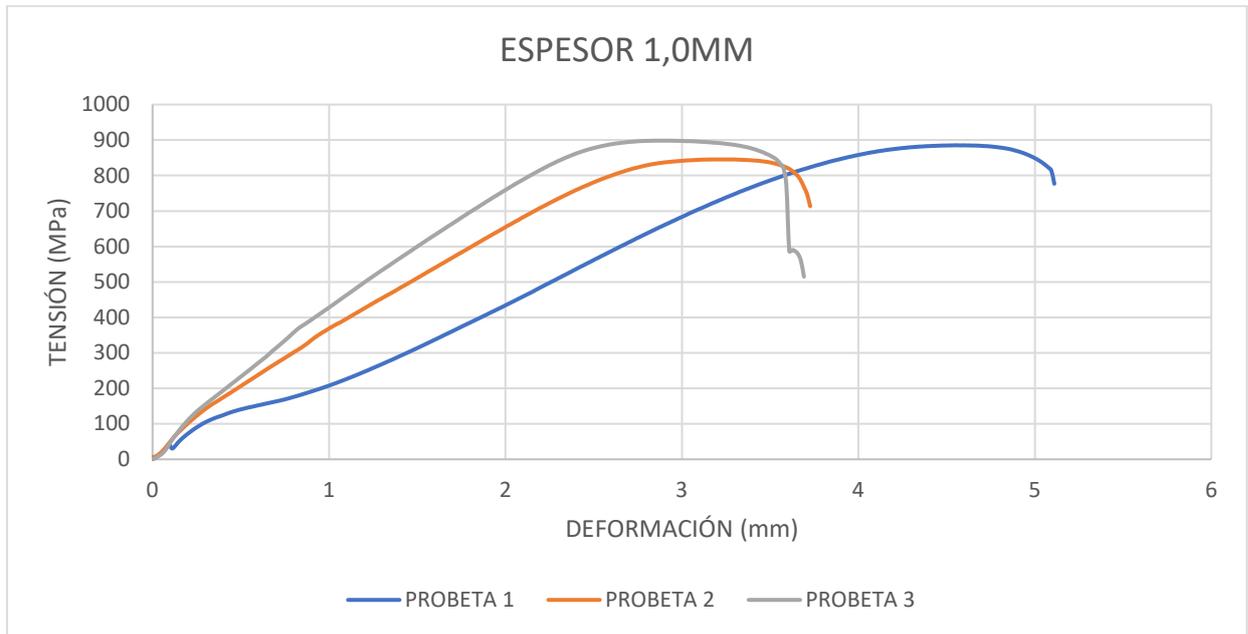


Gráfico 3 – Tensión vs deformación para probetas de espesor= 1,00mm

ESPESOR 1,0	SECCION(MM <sup>2</sup> )	LE (MPa)	$\sigma_{MAX}$ (MPa)
1	20	785,218	884,88
2	20	801,654	843,267
3	20	831,19	898,314
<b>MEDIA</b>		<b>806,020</b>	<b>875,487</b>

Tabla 3 - Resultados del ensayo para espesor =1,00mm



Figura 28 - Probetas de 1,00mm de espesor ensayadas a tracción.

Como podemos observar en la gráfica anterior, la probeta 1 dibuja un recorrido distinto a las curvas de las otras dos probetas, esto se debe a que la probeta estaba ligeramente doblada y hasta que la prensa no tracciona lo suficiente para enderezarla el periodo elástico no está correctamente representado. Podemos estimar que la probeta 1 en realidad se alargaría alrededor de 0,8mm menos de lo marcado en la gráfica.

Acero inoxidable AISI316L + Varilla AISI 316L + Recubrimiento Argón

Espesor 1,5 Laminado hasta 0,75mm

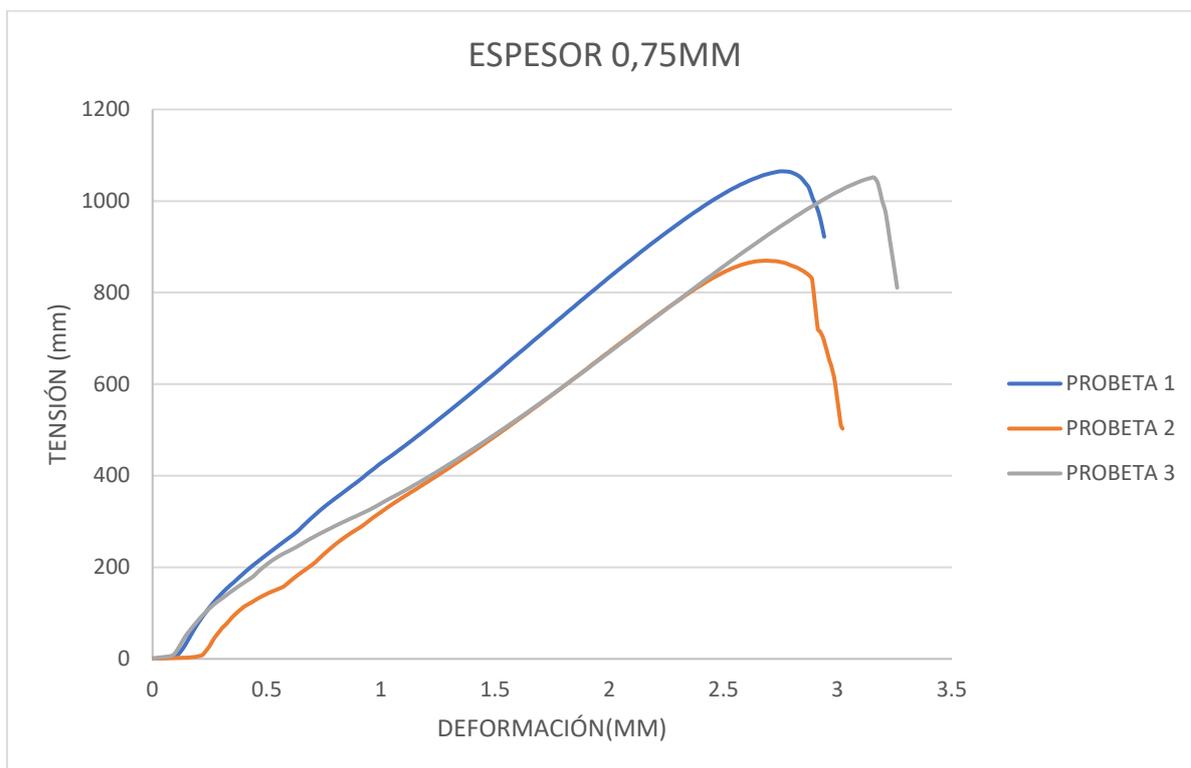


Gráfico 4 – Tensión vs deformación para probetas de espesor= 0,75mm

ESPESOR 0,75	SECCIÓN (MM <sup>2</sup> )	LE (MPa)	$\sigma_{MAX}$ (MPa)
1	15	981,184	1064,424
2	15	786,224	868,881
3	15	980,216	1050,991
<b>MEDIA</b>		<b>915,8746667</b>	<b>994,7653333</b>

Tabla 4 - Resultados del ensayo para espesor =0,75mm



Figura 29 - Probetas de 0,75mm de espesor ensayadas a tracción.

En el caso de este espesor, podemos apreciar plenamente el efecto de la laminación en las probetas ya que el periodo elástico es prácticamente nulo y el límite elástico y la carga de rotura ya han aumentado hasta su valor máximo, puesto que una laminación posterior no lleva a un incremento de los mismos.

**Acero inoxidable AISI316L + Varilla AISI 316L + Recubrimiento Argón**
**Espesor 1,5 Laminado hasta 0,65 mm**


Gráfico 5 – Tensión vs deformación para probetas de espesor= 0,65mm

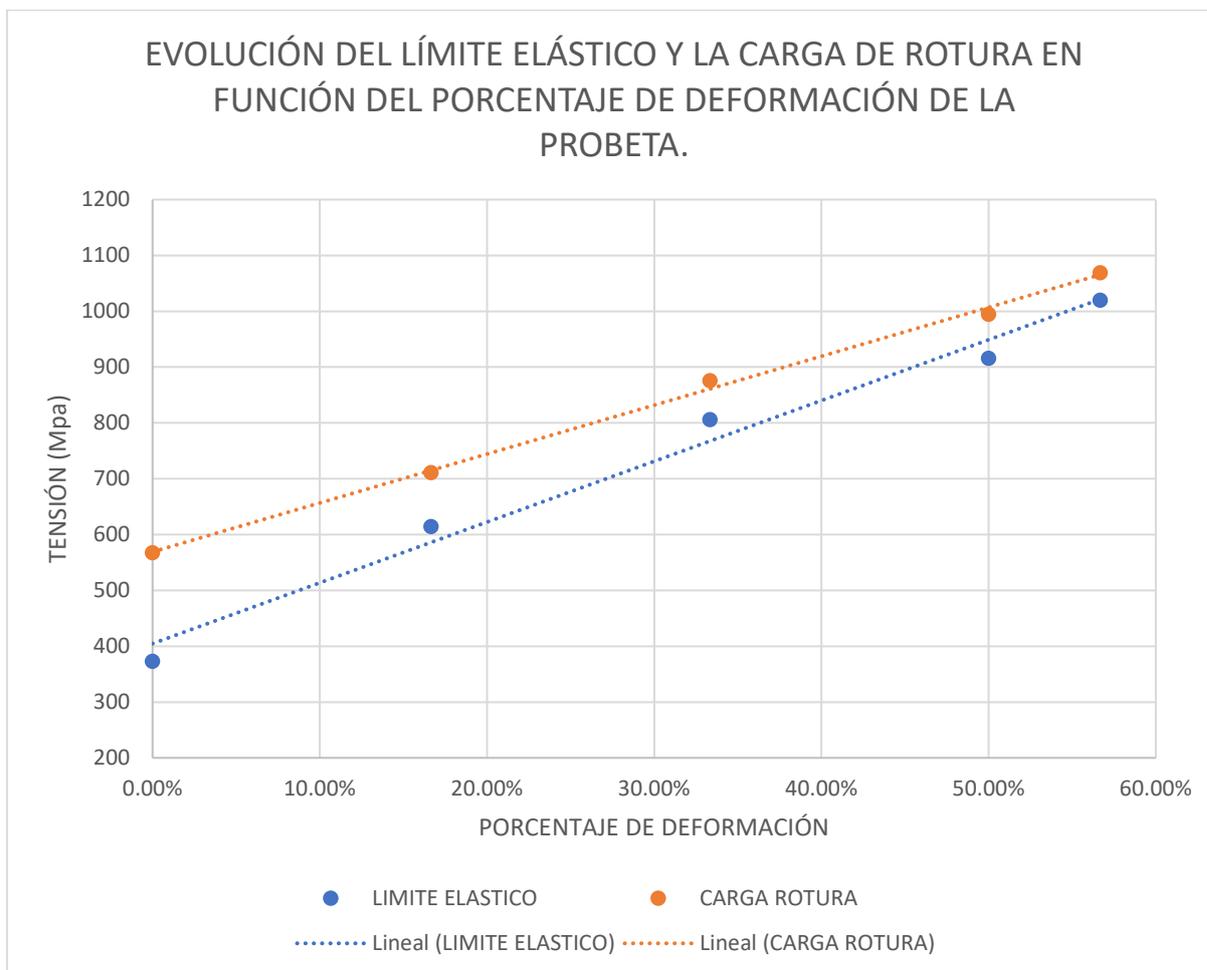
ESPESOR 0,65	SECCIÓN (MM <sup>2</sup> )	F ELAST	$\sigma_{MAX}$
<b>1</b>	13	998,963	1048,456
<b>2</b>	13	1033,522	1067,088
<b>3</b>	13	1026,302	1090,835
<b>MEDIA</b>		<b>1019,595</b>	<b>1068,793</b>

Tabla 5 : Resultados del ensayo para espesor =0,65mm



Figura 30 - Probetas de 0,65mm de espesor ensayadas a tracción.

Una vez más, se puede apreciar cómo a medida que el espesor de la probeta disminuye por el proceso de laminación, la probeta es cada vez más frágil puesto que el periodo plástico es prácticamente nulo y apenas hay alargamiento de la probeta. También se puede apreciar en la fotografía de las probetas como la línea de rotura dibuja un ángulo de 45° debida a las cargas tangenciales que ejercen en ella ya que cada vez su comportamiento es de tipo frágil.



**Gráfico 6 – Tensión vs Porcentaje de deformación**

Como podemos observar en la gráfica 6 anterior donde aparecen tanto las tensiones como los límites elásticos en función del porcentaje de deformación de las probetas. Tanto la carga de rotura como el límite elástico aumentan de manera lineal debido a la acritud inducida en las probetas por el proceso de laminación.

En cuanto a la forma de la rotura, las probetas sin laminación pueden romper indistintamente tanto por el material base como por el cordón de soldadura. No obstante, una vez laminadas e independientemente de la reducción de espesor, las probetas rompen siempre por el cordón de soldadura, señal inequívoca de que la estructura dendrítica del cordón pierde propiedades mecánicas respecto al material base cuando ambos son laminados.

## Capítulo 8: Micrografía

### *8.1 Metalografía*

La metalografía es la rama de la metalurgia que estudia la estructura de un metal y la relaciona con la composición química, con las propiedades mecánicas y físicas. Este estudio se lleva a cabo con la aplicación de diversas y variadas técnicas especiales.

Este método se complementa muy bien con el resto de métodos de estudio de los materiales además de aportar la información necesaria en cuanto a la forma y tamaño del grano. Estos son de valiosa importancia, capaces de ejercer gran influencia sobre la dureza, resistencia a la tracción y fatiga, entre otras.

El análisis micrográfico de un metal se hace sobre una probeta pulida del material que se desea estudiar y que, para poder observar en el microscopio los granos, previamente se debe atacar con un reactivo. Cada constituyente metalográfico tiene una determinada velocidad de reacción con el reactivo de ataque. Los constituyentes menos atacables quedarán con más brillo y reflejarán mayor cantidad de luz en el microscopio, apareciendo más claros a la observación. Esta diferencia permite detectar los distintos constituyentes y determinar su proporción, distribución, tamaño, etc.

### *8.2 Procedimiento*

La correcta preparación de la probeta para la observación microscópica es de fundamental importancia. Para ello se tienen en cuenta los resultados de la observación macroscópica y luego se procede tal como sigue:

- Selección del lugar y extracción de la muestra.
- Montaje de la probeta
- Desbaste.
- Pulido.
- Ataque.
- Observación microscópica.

## Selección del lugar y extracción de la muestra

En nuestro caso, estudiaremos la zona afectada por el cordón de soldadura, por lo que cortaremos un corte transversal en el cordón de la soldadura en la probeta destinada a micrografía de tal modo que en el largo de la pieza a estudiar haya zona de metal base, transición entre el cordón de soldadura y el metal base y por último de soldadura.

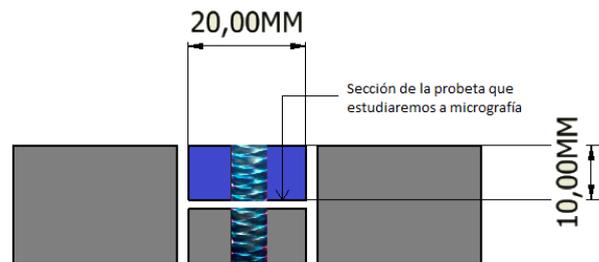


Figura 31- Zona y dimensiones de la probeta para estudiar a micrografía

Para cortar la probeta a las dimensiones deseadas, utilizaremos una sierra de disco con refrigeración mediante taladrina para minimizar la fricción entre el disco de corte y la probeta, ya que tiene un corte más limpio que la cizalla y por lo tanto nos ahorrará tiempo a la hora de preparar la pieza para micrografía puesto que deja menos rayas superficiales.



Figura 32 – Sierra de disco con accionamiento manual.

## Montaje de la probeta

El montaje se realizará mediante el empleo materiales plásticos termoendurecibles que son moldeados con la pieza en su interior mediante una pequeña prensa con calefactor. En nuestro ensayo utilizaremos un compuesto para montajes termoendurecible específico llamado Transoptic (Polimetil Metacrilato) y una máquina de embutir LaboPress 3 – Struers.



Figura 33 y 34 – Máquina de embutición y compuesto termoendurecible

Con la ayuda de un porta piezas, colocaremos la probeta a ensayar en el alojamiento de la máquina embutidora de tal modo que el plano al que queremos hacer la micrografía quede hacia abajo. Posteriormente volcaremos 2 cucharadas del compuesto hasta cubrir por completo la probeta.

Una vez hecho esto, cerraremos con el tapón y comenzaremos el proceso de embutición de la pieza.

Esta tardará 7 minutos en calentarse y 7 en enfriarse, a una fuerza de embutición de 15kN y nos dará como resultado un cubilete transparente con la sección de la probeta a estudiar con el microscopio en el plano inferior.

## Desbaste

El desbaste puede hacerse a mano, pasando la probeta sobre el papel de lija colocada sobre una superficie plana, o mecánicamente con el papel pegado a un disco metálico que gira a velocidades de 100 a 600 r.p.m. Debe tenerse la precaución de girar la probeta 90° al pasar de un grano de desbaste al siguiente, con el objeto de producir rayas perpendiculares y así tener un índice de cuando el último haya eliminado la totalidad de las rayas del anterior.

El desbaste se da por terminado cuando se obtiene una cara completamente plana, con rayas muy finas en toda la superficie, producidas en un solo sentido por el papel de lijado de mayor finura.

Para realizar el desbaste de la probeta en nuestro caso emplearemos unas hojas de lija de grano 200 para el grueso y de 500 y 1000 para el fino. Utilizaremos una desbastadora LaboPol – 21.



Figura 35 – Desbastadora LaboPol 21

## Pulido

El pulido se hace con el objetivo de eliminar todas las rayas finas producidas durante el desbaste. El pulido puede hacerse por medios mecánicos, electrolíticos o químicos. Nosotros emplearemos la misma desbastadora que para el desbaste, pero con un paño de pulido y pasta de diamante con grano de 3µm y 1µm.

## Ataque

El ataque de la muestra sirve para poner en evidencia la estructura del metal o la aleación. Existen diversos métodos de ataque, el más utilizado es el ataque químico. El ataque químico puede hacerse sumergiendo la muestra con la cara pulida hacia arriba

en un reactivo adecuado o pasar sobre la cara pulida un algodón embebido en dicho reactivo o goteando el mismo sobre ella durante un tiempo del orden de los segundos. Luego se lava la probeta con agua, se enjuaga con alcohol y se seca en corriente de aire caliente.

El fundamento del ataque químico consiste en la distinta velocidad de disolución de los diferentes constituyentes metalográficos de la muestra en el reactivo usado. El de mayor velocidad de reacción, se ataca rápidamente y se verá más oscuro al microscopio, mientras que el menos atacable permanecerá más brillante, reflejará más luz y, por consiguiente, se verá más claro en el microscopio. No conviene sobreatacar las probetas, pues se mancharían y se taparía la estructura que buscamos estudiar. Además, las probetas sobreatacadas hay que volver a pulirlas.

En nuestro caso utilizaremos un ataque electroquímico con una disolución de ácido oxálico al 10% en agua destilada y una tensión de 12v y 1,2Amp. Este método consiste en generar una corriente eléctrica entre dos electrodos. Esto se consigue poniendo en contacto eléctrico dos metales diferentes que están sumergidos en un medio electrolito corrosivo, de esta manera se consigue que la corriente fluya desde el metal anódico al catódico a través del electrolito.



Figura 36 – Ataque electroquímico en disolución de Ácido Oxálico al 20% y tensión de 12V y 1,2Amp.

### *8.3 Observación microscópica*

Un microscopio apropiado sirve para observar las microestructuras, medir las dimensiones del grano, observar las diferencias micro estructurales del metal base y del cordón de soldadura y para ver la evolución del tamaño y forma del grano al ser laminado.

En nuestro caso, emplearemos un microscopio metalográfico con el cual iremos viendo con 50X aumentos previamente las rayas que van dejando los métodos abrasivos del desbaste y pulido, con el fin de garantizar el mínimo número de rayas en las micrografías y que posteriormente utilizaremos con 100X aumentos para estudiar la microestructura de nuestras probetas una vez atacadas. Utilizaremos el microscopio óptico que consta de cuatro lentes de diferentes aumentos, de las cuales se han utilizado principalmente las de 50 y 100 aumentos.

Este microscopio tiene incorporado un dispositivo que permite alojar una cámara fotográfica con el fin de permitir realizar fotografías micrográficas. El programa que gestiona las fotografías es Optika Vision y la cámara es una Nikon FX35A que nos servirá para tomar imágenes de las muestras según vayamos analizándolas.

#### ***8.4 Resultados***

Como podemos observar en las micrografías siguientes, en las probetas sin laminar, se pueden apreciar granos poligonales de bordes rectos donde se aprecian las líneas de deformación originales de la fabricación de la chapa, esto se debe a que las chapas que hemos utilizado vienen previamente laminadas a 1,5mm de espesor.

A medida que se va laminando el material, esta cantidad de líneas de deformación aumenta ya que el proceso de laminado en frío aumenta el número de líneas de deformación y su visibilidad. Durante la transición del material base al cordón de soldadura, se pueden apreciar granos dendríticos a causa de la solidificación del material una vez soldado. Estas dendritas tienden a hacerse más pequeñas en las zonas más próximas a la unión del material base y el material de aporte debido al aumento de velocidad de enfriamiento y solidificado del metal fundido mediante la soldadura al estar en contacto con el material base.

A lo largo del estudio de micrografía no se han apreciado zonas de afección térmica en primer lugar por la dificultad de visualizar el tamaño del grano a consecuencia de la presencia de las líneas de deformación y en segundo lugar debido a que los aceros inoxidables auténticos no sufren ninguna transformación metaestable por cambio alotrópico.

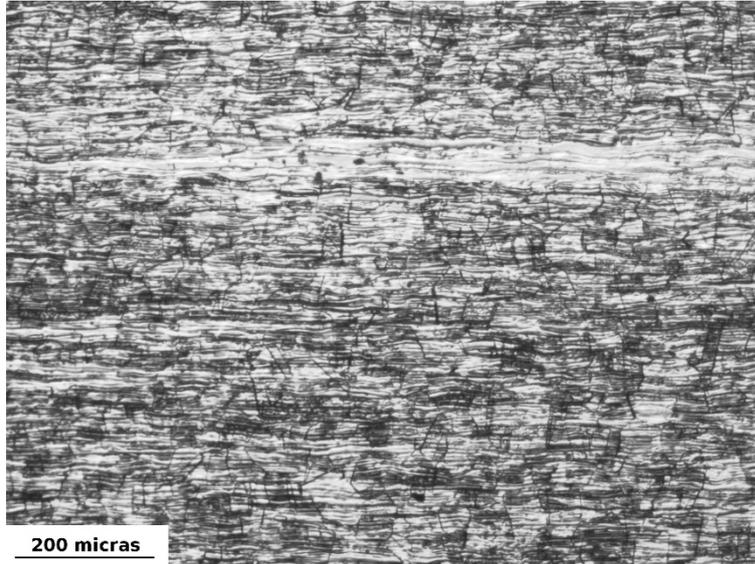


Figura 37 - Espesor 1,5 Sin Laminar -Metal base (x100)

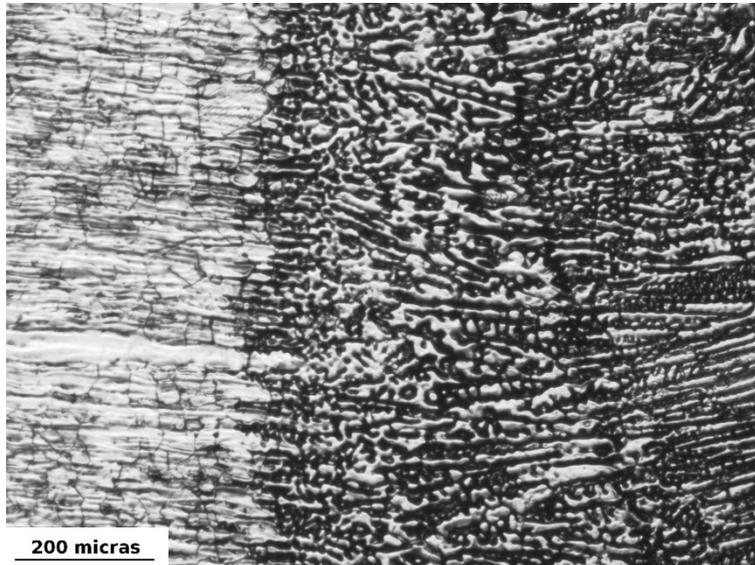


Figura 38 - Espesor 1,5 Sin Laminar – Transición (x100)

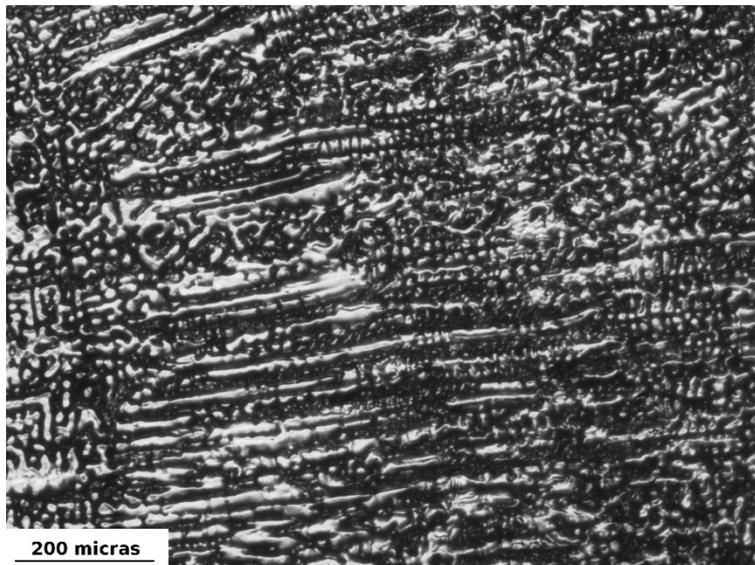


Figura 39 - Espesor 1,5 Sin Laminar – Soldadura (x100)

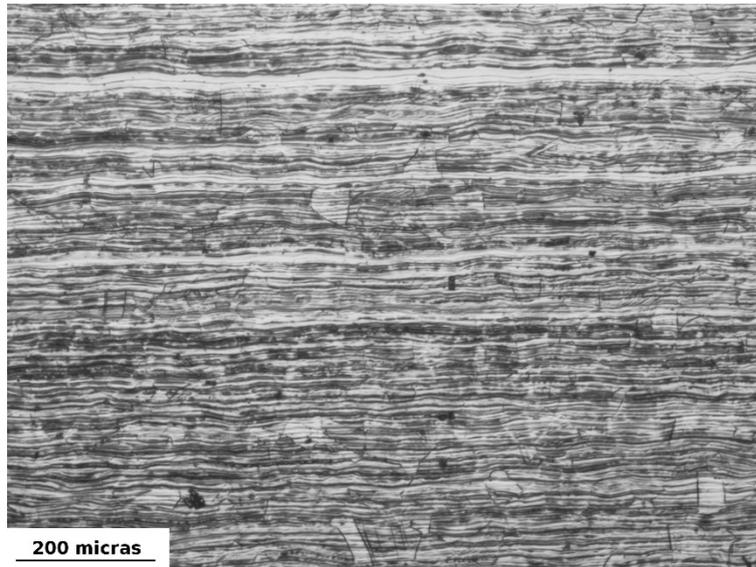


Figura 40 - Espesor 1,5mm laminado hasta 1,25mm – Metal base (x100)

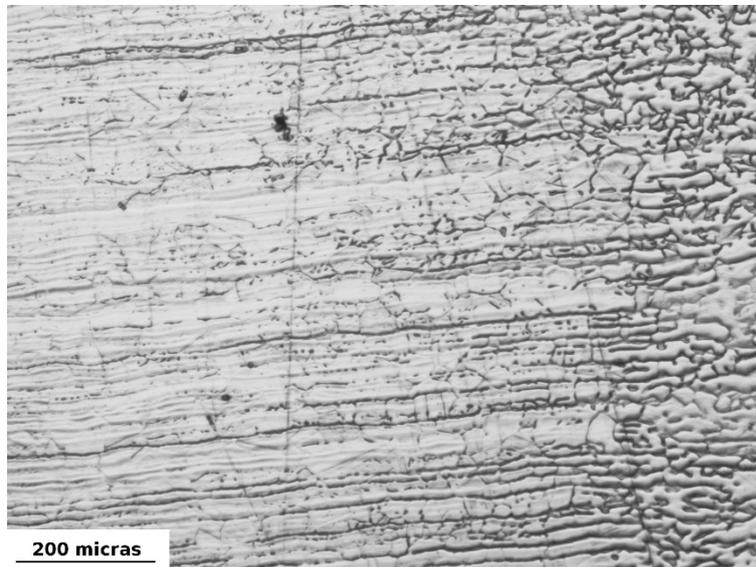


Figura 41 - Espesor 1,5mm laminado hasta 1,25mm – Transición (x100)

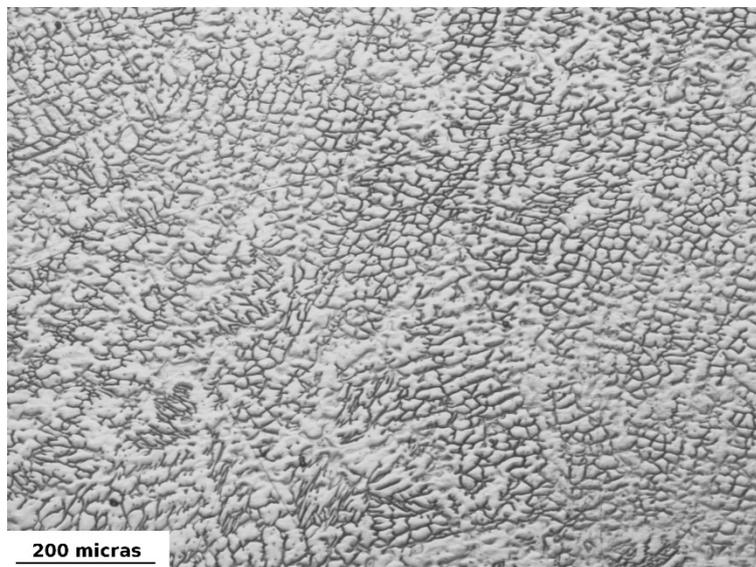


Figura 42 - Espesor 1,5mm laminado hasta 1,25mm – Soldadura (x100)

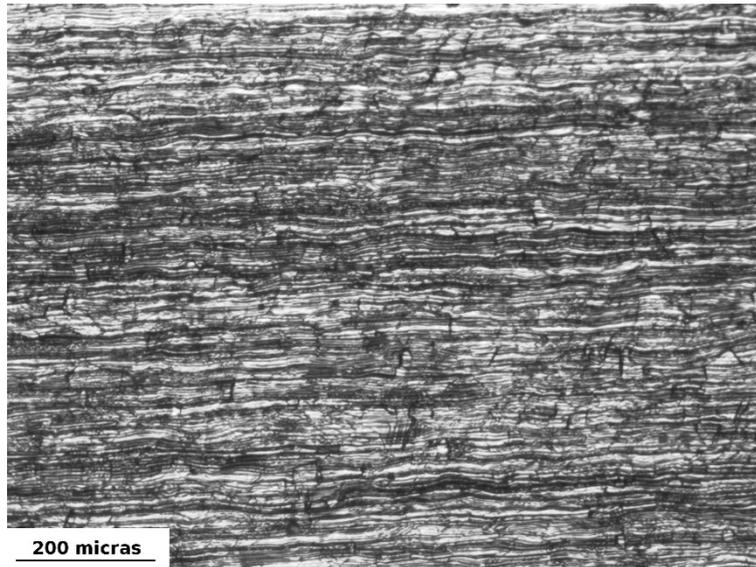


Figura 43 - Espesor 1,5mm laminado hasta 1,00mm – Metal Base(x100)

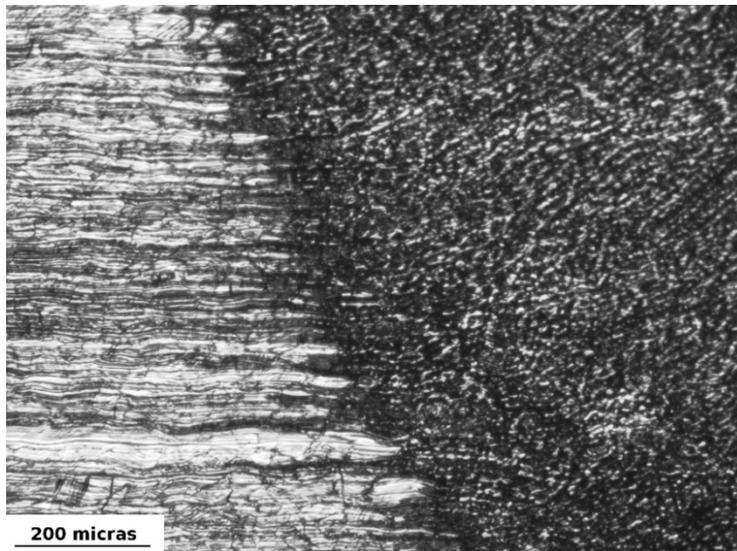


Figura 44 - Espesor 1,5mm laminado hasta 1,00mm – Transición (x100)

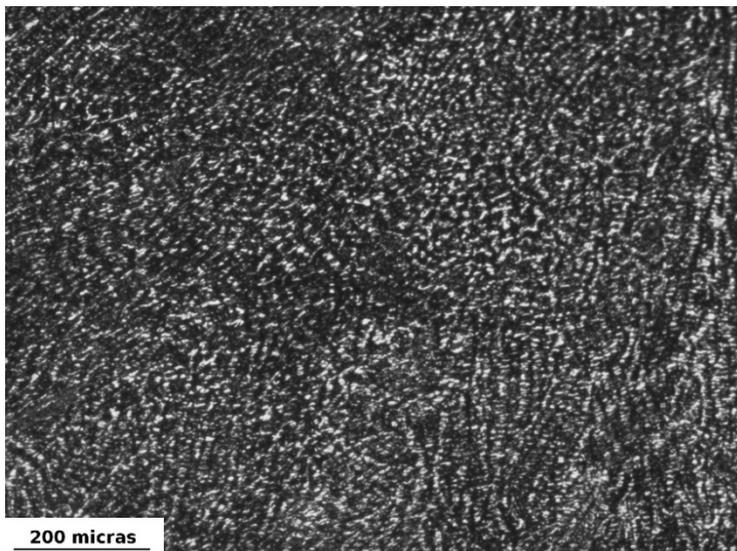


Figura 45 - Espesor 1,5mm laminado hasta 1,00mm – Soldadura (x100)

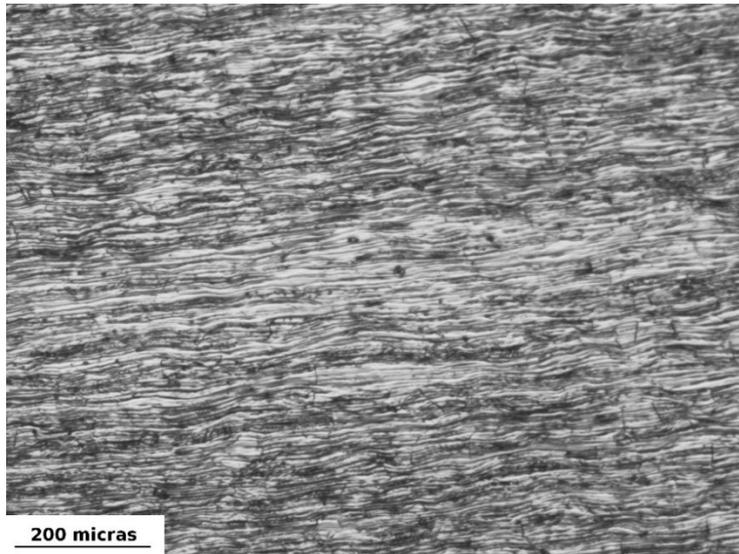


Figura 46 - Espesor 1,5mm laminado hasta 0,75mm – Metal base (x100)

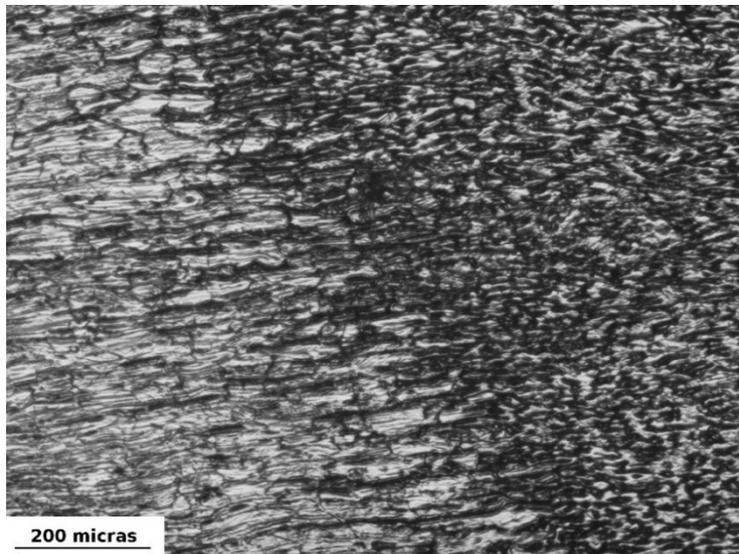


Figura 47 - Espesor 1,5mm laminado hasta 0,75mm – Transición (x100)

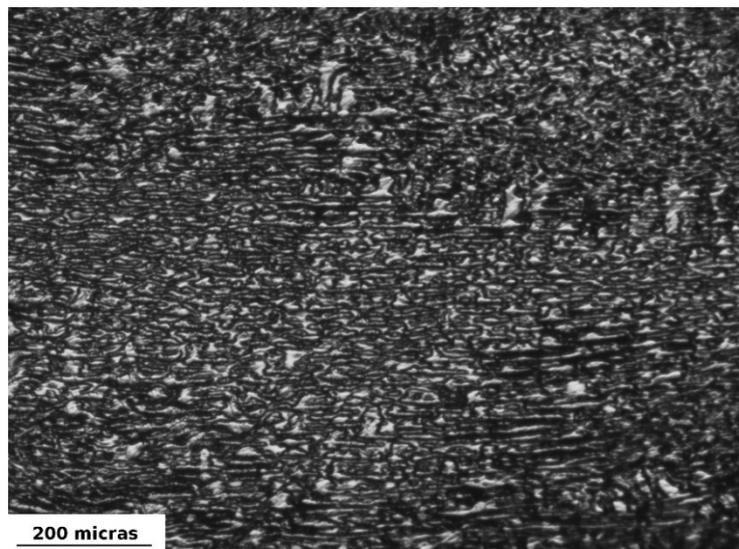


Figura 48 - Espesor 1,5mm laminado hasta 0,75mm – Soldadura (x100)

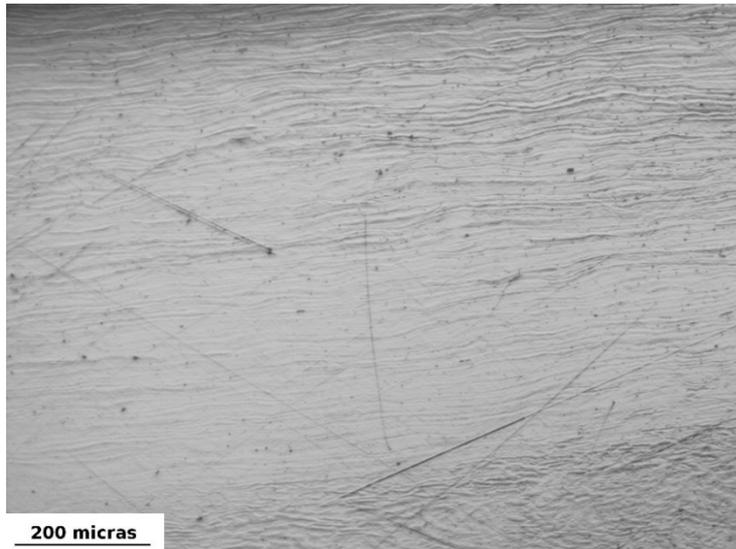


Figura 49 - Espesor 1,5mm laminado hasta 0,65mm – Metal base (x100)

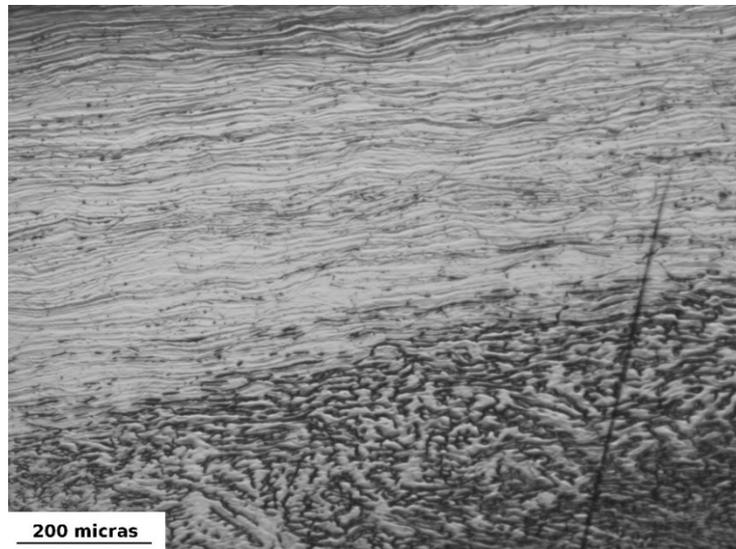


Figura 50 - Espesor 1,5mm laminado hasta 0,65mm – Transición (x100)

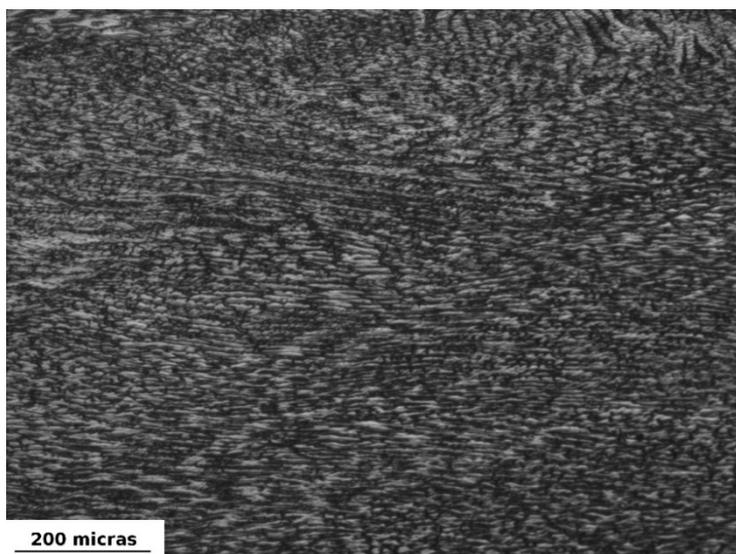


Figura 51 - 1,5mm laminado hasta 0,65mm – Soldadura (x100)

## Capítulo 9: Ensayo de Corrosión

### 9.1 Corrosión en los metales

La corrosión se puede definir como un proceso destructivo que ocasiona un deterioro en el material como resultado de un ataque químico provocado por el medio ambiente.

La forma más común en la que se presenta la corrosión en los metales es por medio de un ataque electroquímico, esto se debe a que los metales cuentan con electrones libres que forman celdas electroquímicas, ocasionando que en cualquier momento se lleve a cabo una reacción química.

Debido a que la corrosión es el resultado de una reacción química, existen diversas condiciones que afectan la cantidad de corrosión que adquiere un elemento, entre estas condiciones se encuentran: la temperatura, el tipo de ambiente, los esfuerzos a los que está sometido el elemento y la erosión.

La corrosión se presenta de diversas maneras en el material. A continuación, se presenta una clasificación según el aspecto que presenta sobre el material.

Existen diferentes maneras en las que se manifiesta la corrosión en los metales, siendo las más comunes:

1. **Corrosión por Ataque Uniforme:** se caracteriza como resultado de una reacción electroquímica o química en toda la superficie del material, que ha sido expuesta a un ambiente corrosivo. Este tipo de ataque constituye el mayor problema de corrosión que presentan los metales (en especial los aceros), pero es relativamente fácil de controlar. Algunas de las recomendaciones para prevenir este tipo de corrosión son: utilizar recubrimientos protectores.
2. **Corrosión Galvánica** (corrosión de dos metales): se produce cuando dos metales en contacto con diferente potencial electroquímico son expuestos a un medio ambiente corrosivo. Esto se debe principalmente a la relación entre el área del ánodo y del cátodo (Ánodo: es aquel electrodo que en una celda electrolítica se disuelve en forma de iones y genera electrones a un circuito externo. Cátodo: es aquel electrodo que en una celda electrolítica acepta electrones). Si la relación del área del ánodo es muy grande en relación al área del cátodo, se presentará un ataque corrosivo rápidamente; por lo contrario, si la relación del área del ánodo es pequeña en relación al área del cátodo, el ataque corrosivo se presentará de forma lenta. Una de las formas más sencillas de prevenir este tipo de corrosión es utilizando un aislante entre las superficies de los metales que se encuentran en contacto.
3. **Corrosión por Picaduras:** este tipo de corrosión, se encuentra en áreas

específicas, es decir, que al ataque se presenta sólo en ciertas zonas del material y produce hoyos o picaduras. Una de las principales causas por las que se presenta esta corrosión es que muchos de los materiales no son homogéneos en toda su superficie, lo que causa que ciertas zonas estén propensas a ser atacadas. Este tipo de corrosión es difícil de detectar, ya que en muchas ocasiones las picaduras que presenta el material son muy pequeñas lo que produce que el problema tienda a agrandarse en la mayoría de los casos. Para prevenir este tipo de corrosión se recomienda usar recubrimientos además de utilizar materiales más resistentes a la corrosión.

4. **Corrosión por Hendiduras:** la corrosión por hendiduras es un tipo de corrosión electroquímica localizada que ocurre en aquellos espacios (hendiduras) que se forman al unir dos materiales; de igual forma se presentan en lugares donde se estanque algún tipo de solución o líquido. Un claro ejemplo de este tipo de corrosión se observa al unir dos placas de diferente material por medio de tornillos, el ataque se manifestará en el espacio que quede entre el tornillo y la placa y en aquellos lugares en donde las dos placas no estén en total contacto una con otra. Para prevenir este tipo de corrosión se recomienda: usar soldadura en lugar de atornillar, eliminar el estancamiento de cualquier tipo de sustancia.
5. **Corrosión Ínter granular:** la corrosión ínter granular es un tipo de corrosión localizada que ocurre en las fronteras de grano del material. En condiciones normales, si un metal sufre de corrosión uniforme, las fronteras de grano sólo serán un poco más reactivas que la matriz, pero bajo otras condiciones, las fronteras de grano pueden ser muy reactivas, lo que resultaría en una corrosión ínter granular que traería como consecuencias la pérdida de resistencia del material e incluso la desintegración de las fronteras de grano. Este tipo de corrosión ocurre principalmente en aquellas aleaciones que en algún momento de un proceso al que sean sometidas, obtengan la oportunidad de formar carburos que precipiten en las fronteras de grano, la principal causa de esta precipitación es la temperatura. Para prevenir este tipo de corrosión se debe tener cuidado en los procesos que requieran un cambio de temperatura.
6. **Corrosión bajo tensiones:** este tipo de corrosión se presenta cuando el material

está sometido a cierto esfuerzo en un ambiente corrosivo, lo que ocasiona que el material se rompa o se fracture. Una vez que aparece este tipo de corrosión las únicas formas de prevenirla son degradando los esfuerzos sobre el material, controlando las condiciones del ambiente o aplicar una protección catódica.

7. **Corrosión por Erosión:** ésta se puede definir como la aceleración que presenta el proceso de corrosión en un material debido a una sustancia corrosiva en movimiento sobre el material. La corrosión por erosión se puede detectar debido a deformaciones sobre la superficie del material que está en contacto con el fluido corrosivo en movimiento, tales como picaduras, hoyos, abultamientos, las cuales ocurren generalmente en la dirección a la que fluye la sustancia corrosiva.
8. **Corrosión por Ataque Selectivo:** este tipo de corrosión tiene como principal característica, que sólo uno de los elementos que forman la aleación es atacado preferencialmente. Algunas de las características con las que se pueden presentar este tipo de corrosión son: cambio de color de la aleación, se presenta porosidad y en algunas ocasiones se empieza a picar. La protección catódica es la recomendada para prevenir la corrosión por ataque selectivo.

## *9.2 Método empleado*

Para estudiar el comportamiento ante la corrosión del acero AISI 316L laminado en frío a distintos espesores, emplearemos el estudio de pérdida de peso o corrosión por pesada, ya que este engloba la mayoría de los tipos de corrosión y es un ensayo fiable y es uno de los más utilizados en estudios de corrosión y oxidación para determinar el grado de deterioro en los metales.

El método de pérdida de peso, relaciona el daño causado por la corrosión en el material estudiado con la variación de peso. Usaremos el Método A – Prueba de Picadura de Cloruro Férrico (Ferric Chloride Pitting Test) de la designación G 48 – 92 de la ASTM (American Society for Testing and Materials).

## *9.3 Procedimiento*

Sabiendo que este método consiste en determinar la pérdida de peso que ha experimentado un determinado metal o aleación en contacto con un medio corrosivo,

pesaremos cada probeta individualmente antes de exponerla al medio corrosivo y, después de 4 días sumergidas, volveremos a pesar para analizar los resultados.

En nuestro caso, sumergiremos las probetas 4 días en una disolución de cloruro férrico en agua destilada al 20% de concentración.

Para llevar un control de las probetas y evitar posibles confusiones, marcaremos con un granete puntos en las probetas siguiendo la siguiente nomenclatura:

1.1.1 – Espesor 1,5mm – Probeta Nº1

1.2.1 – Espesor 1,5mm – Probeta Nº2

1.3.1 – Espesor 1,5mm – Probeta Nº3

2.1.2 – Espesor 1,25mm – Probeta Nº1

2.2.2 – Espesor 1,25mm – Probeta Nº2

2.3.2 – Espesor 1,25mm – Probeta Nº3

3.1.3 – Espesor 1,0mm – Probeta Nº1

3.2.3 – Espesor 1,0mm – Probeta Nº2

3.3.3 – Espesor 1,0mm – Probeta Nº3

4.1 – Espesor 0,75mm – Probeta Nº1

4.2 – Espesor 0,75mm – Probeta Nº2

4.3 – Espesor 0,75mm – Probeta Nº3

5.1 – Espesor 0,65mm – Probeta Nº1

5.2 – Espesor 0,65mm – Probeta Nº2

5.3 – Espesor 0,65mm – Probeta Nº3



Figura 52 – Probetas antes de ensayar a corrosión

El cloruro férrico, es un compuesto químico conocido también bajo nombres como tricloruro de hierro o cloruro de hierro III. Este compuesto forma parte de los compuestos conocidos como haluros de metales, y su formulación química es  $\text{FeCl}_3$ , donde el hierro utiliza su mayor valencia. Los iones de cloro, rompen localmente la capa protectora de óxido de cromo. Durante el desarrollo de una picadura, los productos corrosivos pueden crear una solución muy corrosiva que conduce a procesos de corrosión de alta velocidad, los cuales pueden llegar a generar agujeros de tamaños considerables.

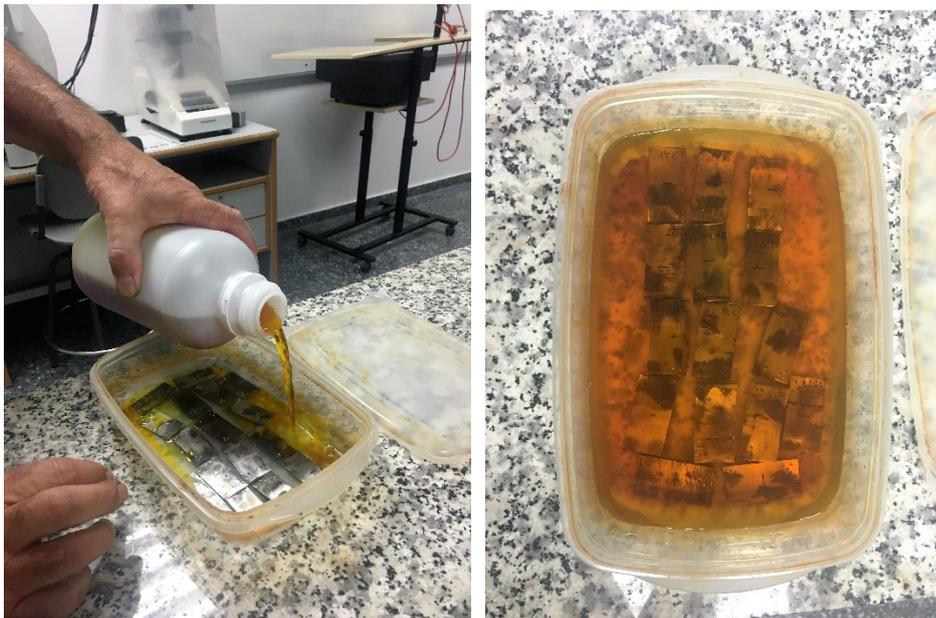


Figura 52 y 53 - Vertido de Cloruro de hierro sobre las probetas.

Dado que el ión cloruro es, con diferencia, el causante más común del ataque por picaduras, los ambientes costeros y marinos son bastante agresivos por la presencia de sal en el ambiente. La probabilidad de que un cierto entorno provoque ataque por picaduras depende de factores tales como la temperatura, la acidez o la alcalinidad y el contenido de gases oxidantes. La resistencia al ataque por picaduras de un acero inoxidable depende de su composición química. El cromo, el molibdeno y el nitrógeno mejoran la resistencia al ataque por picaduras.

En el desarrollo de nuestro proyecto, se han sumergido en cloruro férrico al 20% las probetas que se han laminado previamente a diferentes espesores. De esta manera, podremos observar la influencia de la corrosión húmeda en probetas laminadas a distintos espesores, lo que conlleva distintas tensiones residuales.

## 9.4 Resultados

A continuación, vemos las fotografías de las probetas tras haber estado 4 días sometidas a corrosión húmeda en una disolución de cloruro férrico al 20%.

Como podemos ver en las fotografías, a nivel macroscópico, se puede apreciar que las picaduras que aparecen en las probetas de mínimo espesor pueden considerarse insignificantes; sin embargo, bajo el microscopio encontramos un gran número de picaduras algunas de ellas de gran tamaño como muestra la Figura 57.

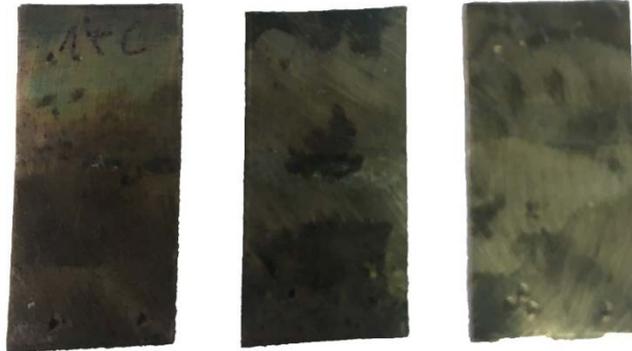


Figura 54 - Probetas AISI316L Sin Laminar 1,5mm tras corrosión húmeda FeCl3.



Figura 55 - Probetas AISI316L Laminada hasta 1,25mm tras corrosión húmeda FeCl3



Figura 56 - Probetas AISI316L Laminada hasta 1,00mm tras corrosión húmeda FeCl3



Figura 57 - Probetas AISI316L Laminada hasta 0,75mm tras corrosión húmeda FeCl3



Figura 58 - Probetas AISI316L Laminada hasta 0,65mm tras corrosión húmeda FeCl3

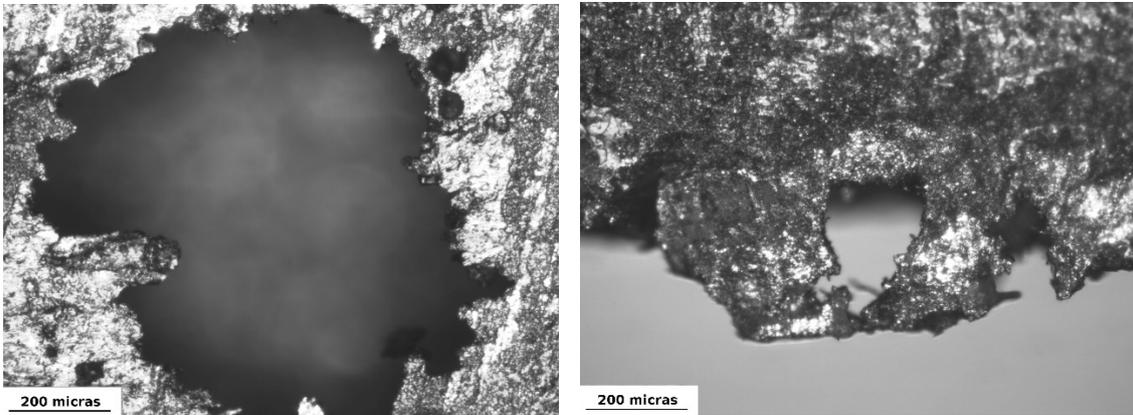


Figura 57 – Picadura de gran tamaño por corrosión en probeta de 0,65mm (X100).

Figura 58 –Borde de la probeta corroído en probeta de 0,65mm (X100).

Para determinar el peso antes y después, utilizaremos una báscula de precisión Sartorius de 0,001g. Una vez limpiadas las probetas en agua destilada, alcohol y secadas con corriente de aire caliente. De esta manera, podremos eliminar cualquier residuo que pueda quedar en la probeta y obtener resultados fiables de la variación de peso que se lleva a cabo por el proceso de corrosión.

Una vez pesadas las probetas, los resultados son los siguientes:

**RESULTADOS PERDIDA DE PESO POR CORROSION ACERO AISI 316L**

<b>1,5mm</b>				
<b>PROBETA</b>	<b>PESO ANTES</b>	<b>PESO DESPUES</b>	<b>DIFERENCIA</b>	
<b>1.1.1</b>	8,223	7,853	0,370	
<b>1.2.1</b>	8,403	7,892	0,511	
<b>1.3.1</b>	8,310	8,027	0,283	<b>PERDIDA UNIT</b>
<b>MEDIA</b>	<b>8,312</b>	<b>7,924</b>	<b>0,388</b>	<b>0,0466795</b>
<b>1,25mm</b>				
<b>PROBETA</b>	<b>PESO ANTES</b>	<b>PESO DESPUES</b>	<b>DIFERENCIA</b>	
<b>2.1.2</b>	7,888	7,526	0,362	
<b>2.2.2</b>	8,182	7,635	0,547	
<b>2.3.2</b>	7,272	6,913	0,359	<b>PERDIDA UNIT</b>
<b>MEDIA</b>	<b>7,781</b>	<b>7,358</b>	<b>0,423</b>	<b>0,05432268</b>
<b>1,0mm</b>				
<b>PROBETA</b>	<b>PESO ANTES</b>	<b>PESO DESPUES</b>	<b>DIFERENCIA</b>	
<b>3.1.3</b>	6,479	6,003	0,476	
<b>3.2.3</b>	6,731	6,189	0,542	
<b>3.3.3</b>	6,734	6,409	0,325	<b>PERDIDA UNIT</b>
<b>MEDIA</b>	<b>6,648</b>	<b>6,200</b>	<b>0,448</b>	<b>0,067338548</b>
<b>0,75mm</b>				
<b>PROBETA</b>	<b>PESO ANTES</b>	<b>PESO DESPUES</b>	<b>DIFERENCIA</b>	
<b>4.1</b>	5,028	<b>4,713</b>	0,315	
<b>4.2</b>	4,946	<b>4,512</b>	0,434	
<b>4.3</b>	4,774	<b>4,338</b>	0,436	<b>PERDIDA UNIT</b>
<b>MEDIA</b>	<b>4,916</b>	<b>4,521</b>	<b>0,395</b>	<b>0,080349878</b>
<b>0,65mm</b>				
<b>PROBETA</b>	<b>PESO ANTES</b>	<b>PESO DESPUES</b>	<b>DIFERENCIA</b>	
<b>5.1</b>	4,447	4,083	0,364	
<b>5.2</b>	4,137	3,677	0,460	
<b>5.3</b>	4,351	3,968	0,383	<b>PERDIDA UNIT</b>
<b>MEDIA</b>	<b>4,312</b>	<b>3,909</b>	<b>0,402</b>	<b>0,093312717</b>

Tabla 6 – Resultados del ensayo por corrosión por diferencia de masa.

## Capítulo 10: Conclusiones

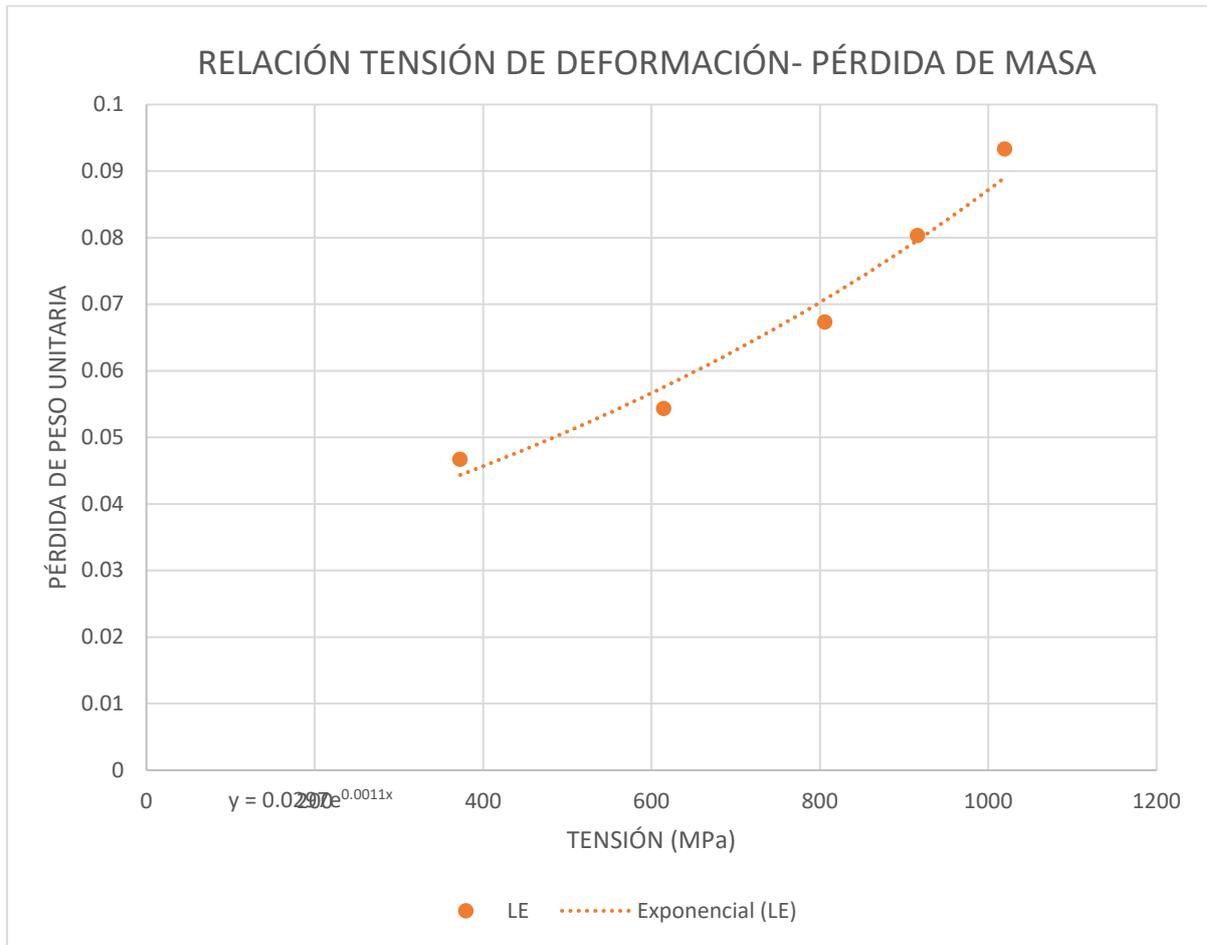


Gráfico 7 – Pérdida de peso unitaria vs Tensión

En base a los resultados obtenidos, se observa que la laminación en frío varía las propiedades mecánicas y estructurales de las soldaduras de acero inoxidable AISI 316L con aporte de acero inoxidable AISI316L y recubrimiento en atmósfera protectora de gas argón.

En lo que concierne a las características mecánicas de las soldaduras, la resistencia mecánica de estas ha sido inicialmente de igual resistencia al metal base, mientras que a medida que se han ido laminando las probetas para disminuir su espesor, éstas han roto siempre por el cordón de soldadura, señal inequívoca de que la estructura dendrítica del cordón de soldadura pierde propiedades mecánicas respecto al material base al ser laminado.

En cuanto a las características frente a la corrosión, todas las soldaduras disminuyen su capacidad frente a la corrosión a medida que disminuimos el espesor. Este patrón se ve representado en la gráfica anterior donde claramente se describe una relación

exponencial positiva en la pérdida de peso por corrosión frente a las tensiones residuales que se van generando en el material a consecuencia de la laminación. Estas tensiones se podrían reducir mediante un recocido, donde el tamaño del grano recuperaría su estado inicial, esto tendría como consecuencia la pérdida de las características obtenidas en la acritud por laminación, pero habría una regeneración de la estructura policristalina y por consiguiente sería menos vulnerable a la corrosión.

## Pliego de Condiciones

El pliego de condiciones tiene como objetivo detallar la maquinaria empleada durante el estudio, los métodos de protección empleados y las normativas que conciernen.

### *SOLDADURA DE CHAPAS*

#### Maquinaria empleada

- Soldador inverter marca TIGMIG TM 170
- Lanza TIG con electrodo de tungsteno
- Amoladora angular Bosch GWS 7-115
- Banco de trabajo
- Botella de gas argón

#### Medidas de protección individual

- Careta automática de factor 9
- Guantes de cuero
- Polainas
- Mandil

#### Normativa

- Hemos seguido la norma ASTM A380 para soldadura de aceros inoxidables.
- Hemos seguido la norma EN166 para la protección ocular y facial en la soldadura.

### *CORTE DE PIEZAS Y OBTENCIÓN DE PROBETAS*

#### Maquinaria empleada

- Cizalla manual
- Tornillo de banco

#### Medidas de protección individual

- Guantes de trabajo
- Gafas de protección

#### Normativa

- Hemos seguido la norma NTP 153: cizalla de guillotina para metal - año 1985
- Hemos seguido la norma NTP 747: guantes de protección

### *LAMINACIÓN DE LAS PROBETAS*

#### Maquinaria empleada

- Laminadora

#### Medidas de protección individual

- Guantes de trabajo
- Gafas de protección

#### Normativa

- Hemos seguido la norma ley de prevención de riesgos laborales 31/1995 para el uso de la maquinaria laminadora.

### *ENSAYO DE TRACCIÓN*

#### Maquinaria empleada

- Máquina de ensayos de tracción universal Instron
- Ordenador
- Célula de carga
- Mordazas

#### Medidas de protección individual

- Guantes de trabajo
- Gafas de protección

#### Normativa

- Hemos seguido la norma UNE-en 10002-1:2002 referente a los ensayos de tracción.

### *MICROGRAFÍA*

#### Maquinaria empleada

- Sierra de disco Remet tr100
- Embutidora Struers labopress-3
- Compuesto Transoptic
- Desbastadora labopol-21
- Hojas de lija de grano 200,500,1000
- Secador de corriente de aire
- Microscopio
- Fuente de alimentación
- Ácido oxálico 10%
- -pasta de diamante de 3um,1um.

#### Medidas de protección individual

- Guantes de trabajo
- Gafas de protección

#### Normativa

Hemos seguido la norma un-en ISO 643:2013 determinación micrográfica del tamaño de grano aparente en metales.

### *ENSAYO POR CORROSIÓN*

#### Maquinaria empleada

- Cloruro férrico 20%
- Campana de extracción
- Balanza digital Sartorius de 0,0001g
- Alcohol
- Secador corriente de aire caliente

#### Medidas de protección individual

- Guantes de trabajo
- Gafas de protección

#### Normativa

- Hemos seguido la norma ASTM G 48 – 92 (American Society for Testing and materials).

## Presupuesto

A continuación, desglosaremos el presupuesto en tres bloques diferentes: materiales, mano de obra y medios auxiliares.

### 1. MATERIALES

CODIGO	UNIDADES	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	PRECIO UNIT	IMPORTE
1.1	UD	10	CHAPAS DE ACERO INOXIDABLE AISI 316L DE DIMENSIONES 200X100X1,5MM	5,00 €	50,00 €
1.2	UD	3	VARILLAS DE ACERO AISI 316L DE 50X1,5MM	3,00 €	9,00 €
1.3	L	80	GAS ARGÓN	0,15 €	42,00 €
1.4	UD	1	VARILLA TUNGSTENO TIG	7,00 €	7,00 €
1.5	UD	1	DISCO DE DESBASTE MILHOJAS	4,50 €	4,50 €
1.6	L	1	CLORURO FÉRRICO	11,00 €	11,00 €
1.7	L	1	ACIDO OXÁLICO	11,00 €	11,00 €
<b>TOTAL MATERIALES</b>					<b>139,50 €</b>

## 2. MANO DE OBRA

### 2. MANO DE OBRA

CODIGO	UNIDADES	CANTIDAD	DESCRIPCION	PRECIO UNIT	IMPORTE
2.1	h	0,5	PREPARACIÓN DE PIEZAS Y PUESTA EN MARCHA DE EQUIPO SOLDADURA	60,00 €	30,00 €
2.2	h	2	SOLDADURA TIG ACERO INOXIDABLE 316L	60,00 €	120,00 €
2.3	h	1	DESBASTE CON AMOLADORA ANGULAR	60,00 €	60,00 €
2.4	h	2	CORTE CON CIZALLA	60,00 €	120,00 €
2.5	h	5	LAMINACIÓN DE PIEZAS A DIMENSIONES CORRESPONDIENTES	60,00 €	300,00 €
2.6	h	0,5	PREPARACIÓN DE PIEZAS Y PUESTA EN MARCHA DE MAQUINA TRACCIÓN	60,00 €	30,00 €
2.7	h	2	ENSAYAR PROBETAS A TRACCIÓN	60,00 €	120,00 €
2.8	h	2	ENSAYAR PROBETAS A CORROSIÓN	60,00 €	120,00 €
2.9	h	3	CORTE, EMBUTIDO, DESBASTE Y PULIDO PROBETAS MICROGRAFÍA	60,00 €	180,00 €
2.10	h	1	ESTUDIO MICROGRÁFICO	60,00 €	60,00 €
				<b>TOTAL</b>	<b>1.140,00 €</b>

### 3. MEDIOS AUXILIARES

CODIGO	UNIDADES	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	PRECIO UNIT	IMPORTE
3.1	h	3	EQUIPO SOLDADURA	50,00 €	150,00 €
3.2	h	1	AMOLADORA ANGULAR	25,00 €	25,00 €
3.3	h	2	CIZALLA	30,00 €	60,00 €
3.4	h	5	LAMINADORA	80,00 €	400,00 €
3.5	h	2	MÁQUINA DE ENSAYO TRACCIÓN	280,00 €	560,00 €
3.6	h	0,5	BÁSCULA PRECISIÓN DIGITAL	30,00 €	15,00 €
3.7	h	1,5	MICROSCOPIO	60,00 €	90,00 €
3.8	h	0,5	FUENTE ALIMENTACIÓN DE	20,00 €	10,00 €
<b>TOTAL MEDIOS AUXILIARES</b>					<b>1.310,00 €</b>

#### 4. RESUMEN PRESUPUESTO:

RESUMEN	COSTE TOTAL
1. MATERIALES	139,00 €
2. MANO DE OBRA	1.140,00 €
3. MEDIOS AUXILIARES	1.310,00 €
<b>TOTAL</b>	<b>2.589,00 €</b>

El presupuesto asciende a dos mil quinientos ochenta y nueve euros.

## Bibliografía

Reina Gómez M. Soldadura de los aceros. Madrid: Weld-Work; 2003.

[1] Alberto Carazo. Tipos acero en la industria farmacéutica. Pulidos y acabados. Ingelyt, ingeniería e instalaciones [Internet]. 2015 [actualizado 22 mayo 2015; citado junio 2017]. Disponible en: <http://ingelyt.com/blog/tipos-acero-en-la-industria-farmaceutica-pulidos-y-acabados/>

[2] Editorial. Cilindros y boquillas para soldadura oxiacetilénica. Tareas universitarias [Internet]. 2013 [actualizado 8 enero 2013; citado junio 2017]. Disponible en: <http://tareasuniversitarias.com/cilindros-y-boquillas-para-soldadura-oxiacetilenica.html>

[3] Fundamentos de soldadura por arco. Lincon electronic [Internet]. [citado junio 2017]. Disponible en: <http://www.lincolnelectric.com/es-mx/support/process-and-theory/Pages/arc-welding-detail.aspx>

La soldadura: definición, clasificación, procedimientos, recomendaciones. Aprender soldadura [Internet]. 2013 [actualizado agosto 2013; citado junio 2017]. Disponible en: <http://aprendersoldadura.blogspot.com.es/2013/08/>

[4] Introducción a la soldadura MIG. De máquinas y herramientas [Internet]. 2011 [actualizado 7 enero 2011; citado junio 2017]. Disponible en: <http://www.demaquinasyherramientas.com/soldadura/soldadura-mig>

Saul González Canteli. Primeros pasos con soldadura semi-automática MIG/MAG. Elementos amovibles y fijos no estructurales [Internet]. 2013 [actualizado 23 diciembre 2013; citado junio 2017]. Disponible en: <http://eafsgc.blogspot.com.es/2013/12/primeros-pasos-con-soldadura-semi.html>

[5] Tipos de soldadura (TIG, MIG/MAG, por puntos). Ilmo [Internet]. 2016 [actualizado 25 noviembre 2016; citado junio 2017]. Disponible en: <https://ilmo.es/soldadura-tig-mig-mag-por-puntos/>

[6] Soldadura por puntos de resistencia. El chapista [Internet]. 2008 [actualizado 2008; citado junio 2017]. Disponible en: [http://www.elchapista.com/soldadura\\_por\\_puntos\\_en\\_las\\_carrocerias.html](http://www.elchapista.com/soldadura_por_puntos_en_las_carrocerias.html)

[7] Edis Argelio Daza Gómez. Proceso de laminación en frío. EdisArgelio [Internet]. 2012. [actualizado 10 abril 2012; citado junio 2017]. Disponible en: <http://edisargelio08.blogspot.com.es/2012/04/proceso-de-laminacion-en-frio.html>

