



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

SOLDADURA DE CHAPAS DE FUNDICIÓN DÚCTIL CON VARILLA DE FE-NI AL 60% Y PROCEDIMIENTO TIG, EFECTUÁNDOSE DISTINTOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Trabajo final de Grado en Ingeniería Mecánica

Alumno: Alberto Herrero Perea

Tutor: Manuel Pascual Guillamón

Cotutor: Fidel Salas Vicente

INDICE

1.	OBJETIVO	5
2.	INTRODUCCION.....	6
3.	MATERIALES.....	7
3.1	Material de las chapas.....	7
3.2	Material de aporte	8
4.	UNION DE PIEZAS MEDIANTE SOLDADURA.....	8
4.1	Soldadura	8
4.2	Tipos de soldadura	9
4.2.1	Soldadura por arco eléctrico	9
4.2.2	Soldadura TIG (Tungsten Inert Gas).....	11
4.2.3	Soldadura MIG/MAG (Metal Inert Gas/Metal Active Gas).....	12
4.2.4	Soldadura por gas.....	13
4.2.5	Soldadura por resistencia	13
4.3	Defectos en la soldadura	14
4.3.1	Falta de penetración	14
4.3.2	Mordedura.....	15
4.3.3	Mala fusión	16
4.3.4	Porosidad	16
4.4	Método empleado y equipo	16
4.5	Procedimiento.....	17
4.5.1	Preparación de piezas	17
4.5.2	Amarre y punteado	18
4.5.3	Cordón de soldadura	18
4.5.4	Acabado	19
4.6	Resultado	19
5.	CORTE DE PIEZAS Y ELABORACION DE PROBETAS.....	20
5.1	Método empleado y equipo	20
5.2	Dimensión de las probetas	21
5.3	Procedimiento.....	22
6.	ENSAYO A TRACCIÓN.....	22
6.1	Tensión de rotura	23
6.2	Módulo de Young.....	24
6.3	Elongación.....	24
6.4	Método empleado y equipo	25

6.5	Sistema de actuación	26
6.6	Resultados.....	27
7.	ENSAYO TRIBOLÓGICO	30
7.1	Método empleado y equipo	30
7.2	Sistema de actuación	31
7.3	Resultados.....	32
8.	MICROGRAFÍA	33
8.1	Metalografía.....	33
8.2	Sistema de actuación	33
8.2.1	Extracción de la muestra	33
8.2.2	Montaje de la probeta.....	34
8.2.3	Desbaste	35
8.2.4	Pulido	37
8.2.5	Ataque	37
8.3	Observación microscópica.....	38
8.4	Resultados.....	39
9.	CONCLUSION.....	44
10.	PLIEGO DE CONDICIONES TÉCNICAS.....	45
10.1	Proceso de soldado de chapas	45
10.2	Proceso de corte de piezas.....	46
10.3	Ensayo de tracción	46
10.4	Ensayo tribológico.....	47
10.5	Micrografías	47
11.	PRESUPUESTO.....	48
11.1	Materiales.....	48
11.2	Maquinaria.....	49
11.3	Mano de obra.....	50
12.	BIBLIOGRAFIA.....	52

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1	Dimensiones de las chapas de fundición laminar	7
Ilustración 2	Varilla fundición Fe-Ni 60%	8
Ilustración 3	Proceso de soldadura.....	9
Ilustración 4	Fuente de Energía	10

Ilustración 5 Soldadura por arco eléctrico	10
Ilustración 6 Soldadura TIG.....	11
Ilustración 7 Soldadura MIG/MAG.....	12
Ilustración 8 Soldadura por gas	13
Ilustración 9 Soldadura por resistencia.....	14
Ilustración 10 Fallo de penetración	15
Ilustración 11 Mordedura.....	15
Ilustración 12 Porosidad.....	16
Ilustración 13 Equipo TIG	17
Ilustración 14 Cordón de soldadura.....	18
Ilustración 15 Desbaste mediante amoladora	19
Ilustración 16 Soldadura nodular Fe-Ni	19
Ilustración 17 Sierra de accionamiento manual.....	21
Ilustración 18 Dimensiones de las probetas	22
Ilustración 19 Maquina Universal Ibertest.....	25
Ilustración 20 Mordazas	26
Ilustración 21 Tribómetro.....	30
Ilustración 22 Amarre Pin on Disk.....	31
Ilustración 23 Probetas sometidas a ensayo tribológico	32
Ilustración 24 Compuesto termoendurecible	34
Ilustración 25 Maquina de embutición Struers.....	35
Ilustración 26 Desbastadora Struers.....	36
Ilustración 27 Microscopio metalográfico	38

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Tensión de rotura	23
Ecuación 2 Módulo de Young	24
Ecuación 3 Elongación máxima.....	25

INDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1 Ensayo a tracción en probetas sin TT.....	27
Gráfica 2 Ensayo a tracción en probetas con recocido a 900 °C	28
Gráfica 3 Ensayo a tracción en probetas con precalentamiento a 450°C.....	29

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Resultados ensayo de tracción sin TT	27
Tabla 2 Resultados ensayo de tracción con recocido.....	28
Tabla 3 Resultados ensayo de tracción precalentamiento	29

1. OBJETIVO

El presente trabajo de final de grado tiene como finalidad observar y realizar un estudio de los cambios que se producen en las propiedades mecánicas de la fundición dúctil con una soldadura con varilla de aporte FE-NI al 60 %, al someterlo a un ensayo tribológico y de tracción en función de diferentes tratamientos térmicos. Posteriormente se estudiará la microestructura del material mediante un ensayo de micrografía.

Para dicho estudio, procederemos a soldar dos chapas del material citado a través del proceso de soldadura de tipo TIG (Tungsten Inert Gas) o tipo GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) como también se le conoce. Además, someteremos las diferentes chapas a diversos tratamientos térmicos: un enfriamiento lento, un precalentamiento de la chapa a 450°C y un recocido a 900 °C.

Para comprobar las diferentes características mecánicas del mismo material sometido a los tratamientos citados anteriormente, se realizará un ensayo tribológico y diversas micrografías en la zona de la soldadura. Además, se realizarán los mismos ensayos en el metal base para poder comparar sus características mecánicas con las del material en contacto con la soldadura.

En definitiva, el objetivo del proyecto consiste en caracterizar la fundición nodular sometida a diferentes tratamientos térmicos a partir de la microestructura y sus características resistentes.

2. INTRODUCCION

Se conoce como fundición al proceso de fabricación de aleaciones de hierro, carbono y silicio, mediante la técnica de colada en molde. Generalmente las fundiciones no permiten la forja, no pueden laminarse y no son dúctiles.

La fundición dúctil, conocida también como fundición nodular o fundición de grafito esferoidal, es la fundición cuya producción se realiza, mezclando diversos materiales como el arrabio, la chatarra, coque y piedra caliza, en hornos cubilotes. Por norma general, el contenido de carbono en el metal, suele presentarse en forma esferoidal.

Este tipo de fundición tiene como principal característica la facilidad para someter dicho material a diversos tratamientos térmicos y mejorar su tenacidad y ductilidad. Por ello tiene una buena fluidez y maleabilidad, presenta una excelente capacidad de mecanizado y una buena resistencia al desgaste. Dicho esto, se puede afirmar que la fundición nodular tiene propiedades semejantes a las del acero en términos de resistencia, tenacidad, ductilidad, conformabilidad en caliente y templabilidad.

Dadas su buena adaptabilidad y resistencia a esfuerzos dinámicos, la fundición dúctil es utilizada para fabricar piezas tales como discos de freno y ejes cigüeñales.

3. MATERIALES

3.1 Material de las chapas

Se van a emplear chapas de fundición nodular de dimensiones 50 X 100 X 5 mm

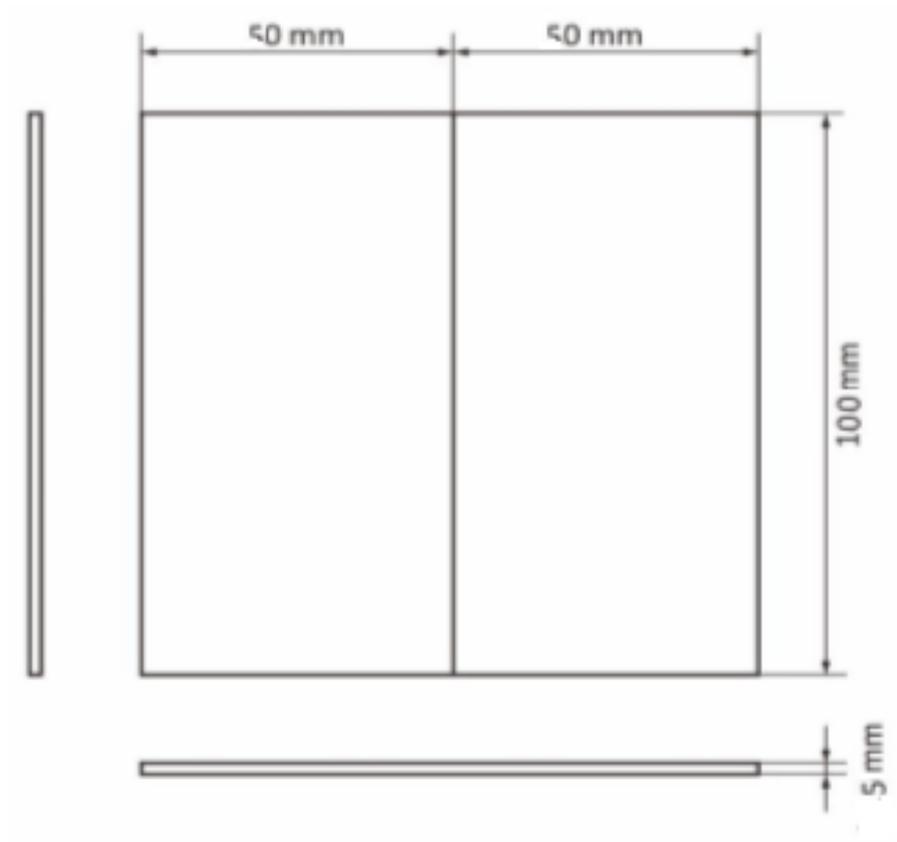


Ilustración 1 Dimensiones de las chapas de fundición laminar

3.2 Material de aporte

El material de aporte que se va a utilizar en el proceso de soldadura será Fe-Ni al 60%



Ilustración 2 Varilla fundición Fe-Ni 60%

en forma de varilla.

4. UNION DE PIEZAS MEDIANTE SOLDADURA

4.1 Soldadura

Se conoce como soldadura al proceso de unión mediante fusión de dos materiales. Para ello, se aplica calor en la zona de unión para obtener un pequeño volumen de material fundido. Una vez la mezcla de materiales se solidifica, se genera una unión metalúrgica entre los dos materiales.

Podemos encontrar dos tipos de mezclas: directa, cuando únicamente entran en contacto los materiales de las piezas que se desean unir, o indirecta, cuando utilizamos un aporte de otro material de relleno para formar la unión. En el estudio utilizaremos este último tipo de mezcla.

Aunque, generalmente, se asocia la soldadura con los metales, cualquier tipo de material con la capacidad de calentarse, fundirse y solidificarse formando dicha unión, se puede soldar. De este modo, podemos decir que los plásticos y vidrios que cumplan dichas condiciones se pueden soldar, aunque no es lo más común.

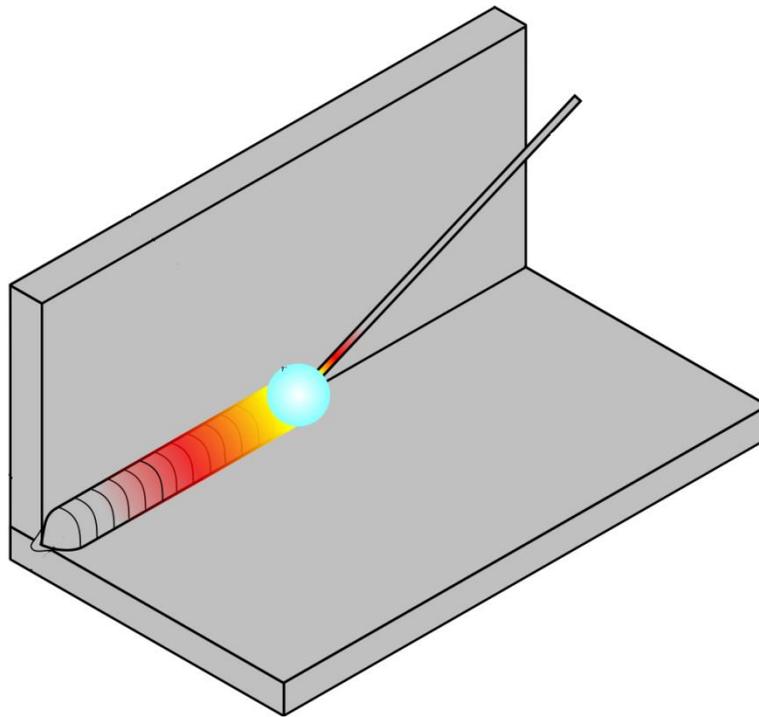


Ilustración 3 Proceso de soldadura

4.2 Tipos de soldadura

Existen diversos tipos de soldadura, en función de la técnica y el equipamiento necesario. A continuación, se citarán los tipos más comunes:

4.2.1 Soldadura por arco eléctrico

La soldadura por arco eléctrico es una de las técnicas más utilizadas en la actualidad por su bajo coste. Su principio básico consiste en utilizar una fuente de alimentación para crear una diferencia de potencial entre dos conductores en contacto. Una vez separados los conductores, se provoca una chispa que ioniza el aire o el gas, permitiendo generar un arco voltaico que transforma la energía eléctrica en calórica. De esta manera, el arco voltaico calienta el material hasta su punto de fusión.

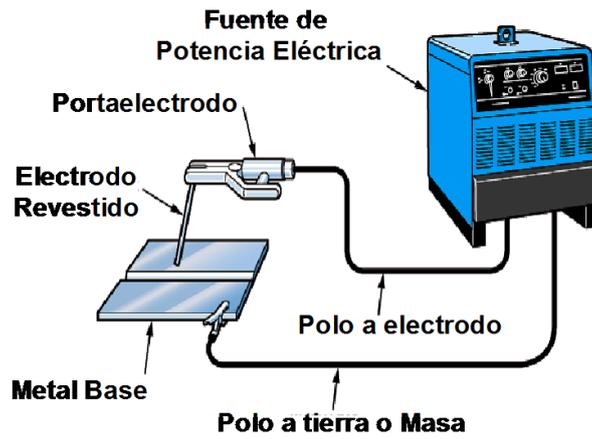


Ilustración 4 Fuente de Energía

Este tipo de soldadura, como se ha citado anteriormente, tiene como ventajas su bajo coste y que penetra muy bien. Por el contrario, la desventaja principal que tiene esta técnica es que antes y después de utilizar este proceso se debe someter a la eliminación de escoria.

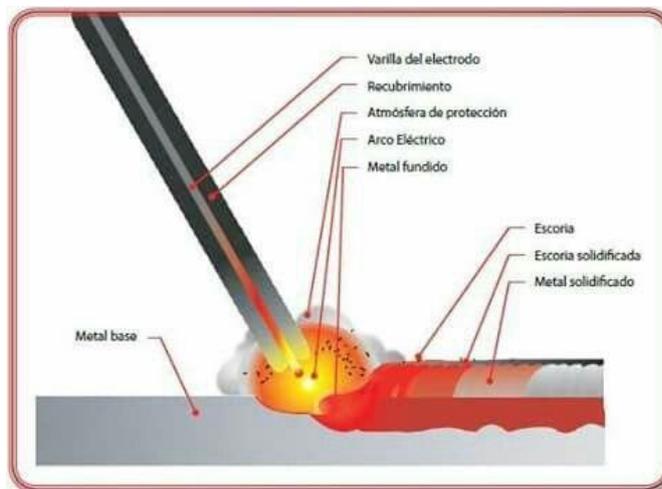


Ilustración 5 Soldadura por arco eléctrico

4.2.2 Soldadura TIG (Tungsten Inert Gas)

También conocido como GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) este tipo de soldadura se basa en generar un arco eléctrico entre el electrodo, de tungsteno y no consumible, y el material que se desea soldar, mediante el cual se obtiene la energía calorífica necesaria para fundir dicho material. Como característica, la zona de la soldadura se protege por un gas inerte de los agentes climatológicos. Cuando la zona de la soldadura no queda cubierta y se necesita un material de relleno, el material de relleno se aporta generalmente en forma de varillas.

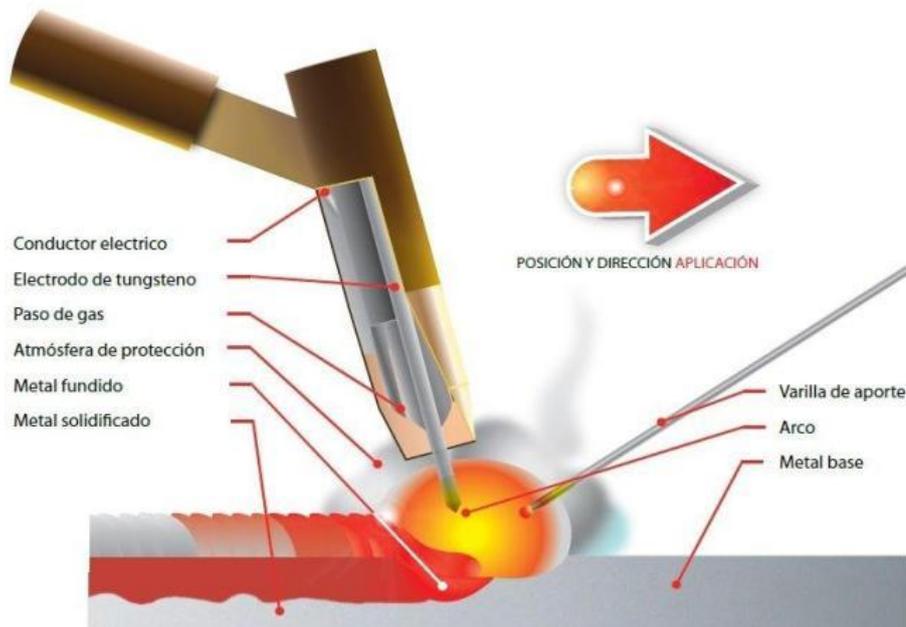


Ilustración 6 Soldadura TIG

Esta técnica nos aporta como ventaja principal que permite soldar con mayor facilidad distintos espesores. Además, por lo general, el cordón de la soldadura presenta un buen acabado final.

Por otro lado, la desventaja que presenta dicho tipo de soldadura es que requiere una mayor habilidad y precisión en comparación a otras técnicas de soldadura.

4.2.3 Soldadura MIG/MAG (Metal Inert Gas/Metal Active Gas)

La soldadura MIG/MAG es un tipo de soldadura por arco eléctrico donde el aporte de material se produce a través de un hilo consumible, a diferencia de la soldadura por electrodo. El hilo consumible se aísla de la atmosfera por un gas, ya sea inerte en la soldadura MIG, o un gas activo en la soldadura MAG.

Las principales ventajas que presenta este proceso es que es una técnica bastante sencilla de realizar y que, al no tener que estar cambiando el electrodo de manera continua, es mucho mas productivo. Por otra parte, la principal desventaja que encontramos en este proceso es que es imposible aplicar esta técnica a la hora de soldar un acero de gran grosor.

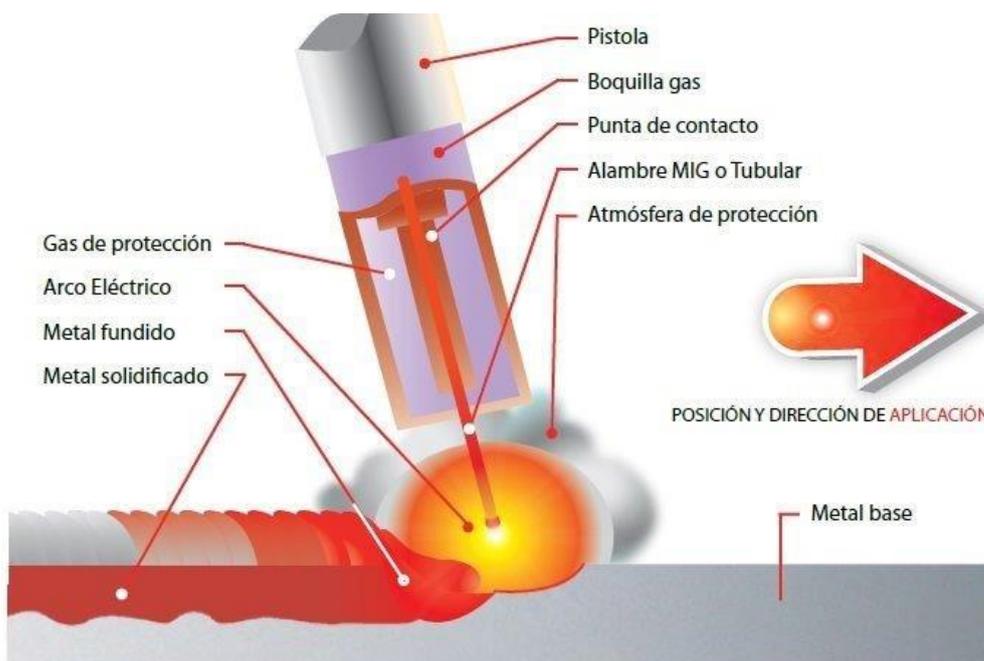


Ilustración 7 Soldadura MIG/MAG

4.2.4 Soldadura por gas

Este proceso de soldadura también conocido como soldadura oxiacetilénica se basa en la generación de calor por combustión del oxígeno y del gas acetileno. Ambos materiales se mezclan y, mediante un soplete, se genera el calor necesario para llegar a la temperatura de fusión de los materiales.

La soldadura por gas tiene como ventajas la poca dificultad del proceso, la movilidad que tiene el equipo, al no tratarse de un equipo muy complejo, y su bajo coste. Por otro lado, la parte negativa de esta técnica se basa en la gran cantidad de tiempo que necesitan los materiales soldados para enfriarse.

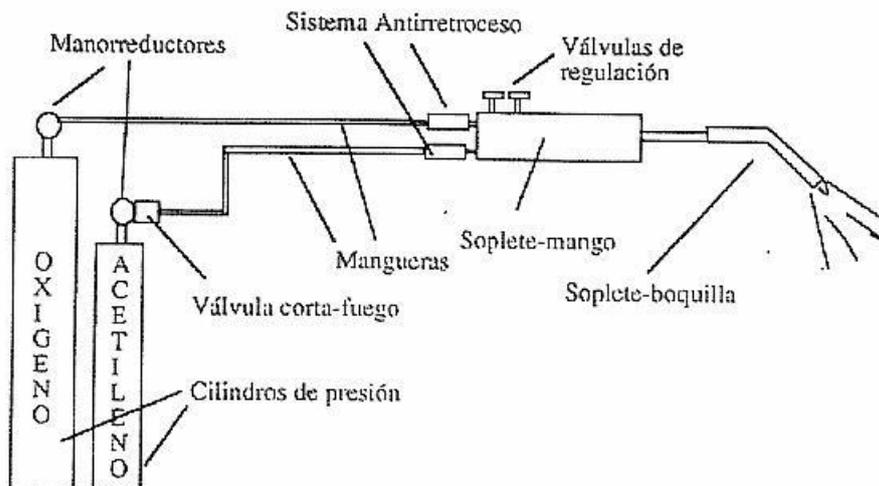


Ilustración 8 Soldadura por gas

4.2.5 Soldadura por resistencia

También conocida como soldadura por puntos, este tipo de soldadura consiste en generar calor mediante unos electrodos no consumibles. Además, hasta llegar a la temperatura de fusión de los materiales a soldar, se realiza una presión entre ambas piezas para facilitar la soldadura.

Las principales ventajas que nos aporta este tipo de soldadura son, la rapidez y limpieza del proceso. Como principal desventaja que sufre este método respecto a otros es la imposibilidad de añadir un material de aportación.

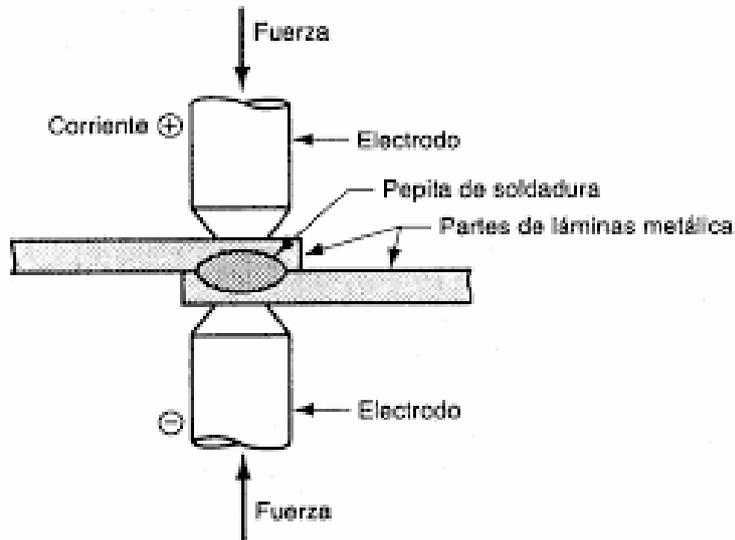


Ilustración 9 Soldadura por resistencia

4.3 Defectos en la soldadura

Existe la posibilidad, durante el proceso de soldadura, de que surjan diferentes defectos en la pieza, los cuales no permitan conseguir una soldadura perfecta. A continuación, se procederá a enumerar los mas habituales.

4.3.1 Falta de penetración

Este defecto se produce cuando el material de aporte y el baño de fusión no penetra de manera adecuada entre las chapas, lo que produce que el nexo de unión entre las mismas no sea lo suficientemente fuerte.

Por norma general, este defecto surge cuando, por causas diversas, se tiene que detener el proceso de soldado de las piezas y posteriormente se tiene que reanudar.

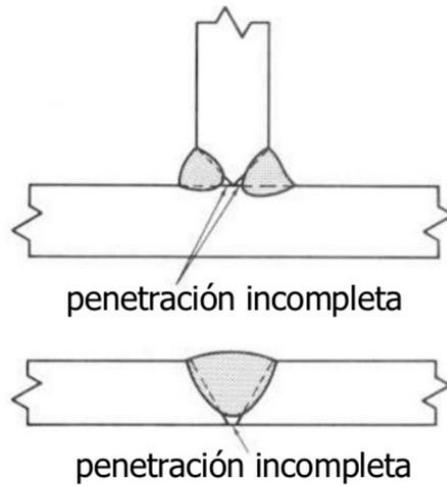


Ilustración 10 Fallo de penetración

4.3.2 Mordedura

La mordedura es un defecto que se genera en los bordes de un cordón en forma de surco. Dicho surco suele aparecer por distintos errores de ejecución como puede ser tomar un ángulo incorrecto de la lanza, una velocidad elevada a la hora de realizar el cordón o un exceso de intensidad.

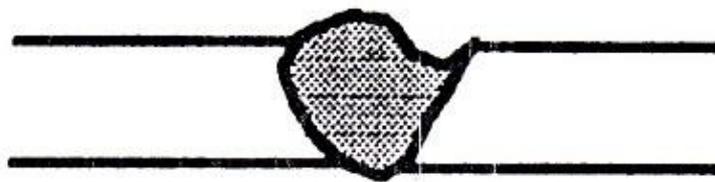


Ilustración 11 Mordedura

4.3.3 Mala fusión

La mala fusión es un defecto en la soldadura que se produce cuando el material de aporte fundido o el electrodo desliza sobre el material base sin haber realizado el baño de fusión correctamente.

Generalmente, esto sucede cuando no se posiciona en el ángulo correcto la lanza o si se trabaja a una intensidad inadecuada.

4.3.4 Porosidad

Consiste en la contaminación del metal mediante un gas que aparece en forma de



Ilustración 12 Porosidad

burbuja por norma general en el cordón de la soldadura. Es decir, el metal fundido absorbe los gases emitidos en el proceso y, una vez solidifica, el material emite el gas en forma de poro.

4.4 Método empleado y equipo

Para este estudio se ha empleado como método de soldadura el método TIG (Tungsten Inert Gas), puesto que el cordón resultante de la soldadura presenta un buen acabado final, y permite una buena soldadura en cualquier tipo de metal.

El equipo principal consta de un soldador TIGMIG170, el cual está diseñado para soldar TIG DC de alta frecuencia y MMA. Además, se utilizará un electrodo de tungsteno y como gas aislante gas Argón.



Ilustración 13 Equipo TIG

Basándonos en los estándares de calidad, protección y seguridad para realizar el proceso de soldadura se utilizarán los siguientes EPI's:

- Mascara de protección contra radiaciones
- Bata de trabajo
- Botas de seguridad
- Guantes de protección térmicos

4.5 Procedimiento

4.5.1 Preparación de piezas

Preparar y limpiar las piezas a soldar es el primer requisito indispensable para un buen resultado. Mediante un disolvente universal, se limpian las piezas a soldar poniendo especial atención en los cantos de las chapas que van a estar en contacto.

Con este proceso pre-soldadura, se garantiza un buen resultado de soldadura, evitando porosidad o defectos producidos por la contaminación del material.

4.5.2 Amarre y punteado

Para que durante el proceso de soldado no se muevan las piezas a soldar, se deben amarrar mediante unos sargentos al banco de trabajo. Además, se coloca entre la pieza y el sargento una chapa de metal para que las tensiones ejercidas sobre las chapas se distribuyan de manera simétrica.

Por otro lado, y para conseguir que el baño de fusión descuelgue de manera correcta entre las piezas, se debe dejar un espacio entre las superficies a soldar en forma de V. De esta manera, cuando se realicen los puntos de soldadura en el extremo más cerrado, el calor proporcionado irá cerrando el ángulo que nos facilitará el trabajo a la hora de realizar el cordón de la soldadura.

4.5.3 Cordón de soldadura

La ejecución del cordón entre las piezas es una de las partes mas importantes del proceso de soldado. Para que el resultado sea el adecuado, el material de aporte debe penetrar entre las piezas de manera uniforme, ya que si, al realizar el cordón de la soldadura, quedan zonas con diferentes espesores, puede afectar a los posteriores estudios y los datos no serían fiables.



Ilustración 14 Cordón de soldadura

4.5.4 Acabado

El último paso en el proceso de soldadura TIG consiste en, mediante la ayuda de una amoladora angular tipo milhojas, eliminar la escoria sobrante del material aportado y pulir el cordón de la soldadura por ambos lados para conseguir una superficie uniforme.



Ilustración 15 Desbaste mediante amoladora

4.6 Resultado

A continuación, se muestra un ejemplo de las chapas de fundición dúctil soldadas con varilla de aporte Fe-Ni al 60% mediante el método TIG:



Ilustración 16 Soldadura nodular Fe-Ni

A pesar de la técnica de soldado, la cual tiene una elevada complejidad, el resultado conseguido tiene un buen aspecto final. El cordón de la soldadura es uniforme, no presenta mordeduras y no es necesario añadir más material de aporte.

Al ser varias piezas, todas tienen un acabado parecido al anterior, aunque en algún caso concreto han surgido defectos de mordedura, los cuales se han solventado cortando la pieza y desechando esa parte.

Si el material de aporte no hubiese sido suficiente, bastaría con añadir más material tapando las zonas afectadas y volviendo a desbastar con la amoladora milhojas.

5. CORTE DE PIEZAS Y ELABORACION DE PROBETAS

Para realizar los ensayos de tracción, tribológicos y análisis de micrografía de las piezas, se deben cortar las chapas soldadas en diversas probetas de menor tamaño para facilitar su estudio.

5.1 Método empleado y equipo

El equipo que se ha utilizado para obtener las probetas ha sido una sierra de accionamiento manual refrigerada con taladrina. De esta manera, y puesto que se trata de chapas de fundición dúctil, se realizará un corte preciso y sin ningún tipo de complicación.



Ilustración 17 Sierra de accionamiento manual

Este método es una manera rápida y efectiva ya que, además de ser un proceso simple, no deja prácticamente rebaba una vez cortada la pieza.

5.2 Dimensión de las probetas

Serán necesarias 6 probetas de cada chapa tratada térmicamente de 50 mm de longitud y 20 mm de anchura, 3 para el ensayo de tracción y otras 3 para el ensayo tribológico.

Por otro lado, será necesario cortar una probeta más pequeña de cada chapa, con unos 10 mm de anchura para realizar el estudio de micrografía de las piezas.

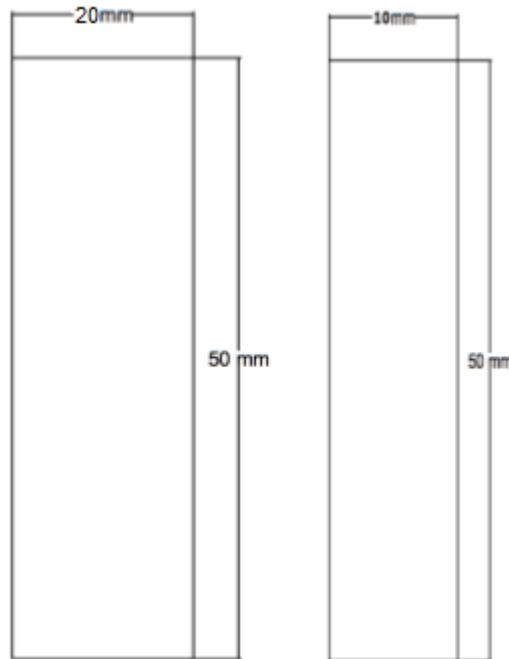


Ilustración 18 Dimensiones de las probetas

5.3 Procedimiento

El primer paso en el proceso de corte de las chapas consiste en marcar las medidas deseadas en las diversas piezas. Una vez realizado, se procederán a cortar las chapas con la sierra de accionamiento manual, obteniendo así las probetas necesarias para el estudio.

Será obligatorio el uso de gafas y guantes de seguridad para trabajar de manera segura y evitar cualquier tipo de incidente no deseado.

6. ENSAYO A TRACCIÓN

El ensayo a tracción es, sin duda alguna, el ensayo de tipo destructivo más utilizado para conocer y caracterizar las propiedades mecánicas de un material.

Para ello, se somete la probeta de ensayo a una fuerza de tracción, la cual genera que el material se estire hasta que no aguante la fuerza aplicada. En este momento, el material romperá y tendremos cuantificadas diversas características mecánicas propias del mismo.

6.1 Tensión de rotura

Se conoce como tensión de rotura a la tensión máxima que soporta un material antes de que rompa de manera transversal.

El procedimiento para obtener la tensión máxima de rotura es el ensayo de tracción, el cual registra, de manera simultánea, la tensión y la deformación que va soportando el material.

De manera gráfica, dibujando la curva entre la tensión soportada y la deformación obtenida, cuando la curva llega a su punto más alto, este valor corresponde a la tensión de rotura.

Si se desea obtener de manera analítica el cálculo de la tensión de rotura será de, obligatoria necesidad, basarse en la siguiente formula:

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

Ecuación 1 Tensión de rotura

Donde:

σ_r : Tensión de rotura

F_r : Carga máxima que soporta la probeta

A : Área de la sección transversal del material

6.2 Módulo de Young

El módulo de Young o módulo de la elasticidad relaciona directamente el aumento de la deformación longitudinal unitaria con el incremento de la tensión aplicada. Mediante este módulo se puede caracterizar la rigidez de un material. Es decir, la rigidez crece de manera directamente proporcional en función del aumento del módulo de Young.

Por otro lado, el módulo de Young es constante, dentro del límite elástico del material, y es siempre mayor a 0.

La unidad que cuantifica el módulo de Young en el sistema internacional es el Pascal.

Para obtener el módulo de elasticidad de un material, se utiliza la siguiente ecuación:

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

Ecuación 2 Módulo de Young

Donde:

E: Módulo de Young

Fe: Carga elástica

Δl : Diferencia entre longitud inicial y final

A: Sección de la probeta

6.3 Elongación

La elongación es la propiedad mecánica que caracteriza la maleabilidad de un material y la capacidad de deformación plástica del mismo bajo un esfuerzo constante.

Es decir, cuanto mayor sea la relación entre el alargamiento longitudinal y la disminución de la sección transversal, mayor ductilidad presentará el material. Para calcular dicha relación, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\%EL = \left(\frac{L_f * L_0}{L_0} \right) * 100$$

Ecuación 3 Elongación máxima

6.4 Método empleado y equipo

Para obtener las diferentes propiedades mecánicas de la fundición dúctil, en función de los diversos tratamientos térmicos aplicados, se ha utilizado una maquina universal de ensayos Ibertest.

Dicha máquina está formada por dos cabezales, ambos equipados con mordazas para amarrar la probeta a ensayar. El cabezal superior es fijo, mientras que el inferior tiene la capacidad de moverse mediante un control remoto que tiene la máquina.

Por otro lado, todos los resultados obtenidos aparecen directamente en un ordenador, el cual está conectado a la máquina.



Ilustración 19 Maquina Universal Ibertest

6.5 Sistema de actuación

La primera parte del ensayo consiste en la introducción de datos en el software de la máquina. Dichos datos vienen dados por la dimensión, el espesor y la sección de la probeta a analizar.

Una vez se han introducido los datos, el propio software indica los pasos a seguir:

- Sujetar la probeta en la mordaza del brazo móvil sin apretar del todo.
- Accionar el botón en el mando correspondiente al avance vertical del brazo móvil.
- Sujetar la probeta en la mordaza del brazo fijo.
- Apretar ambas mordazas y pulsar la barra espaciadora del teclado para iniciar el ensayo.



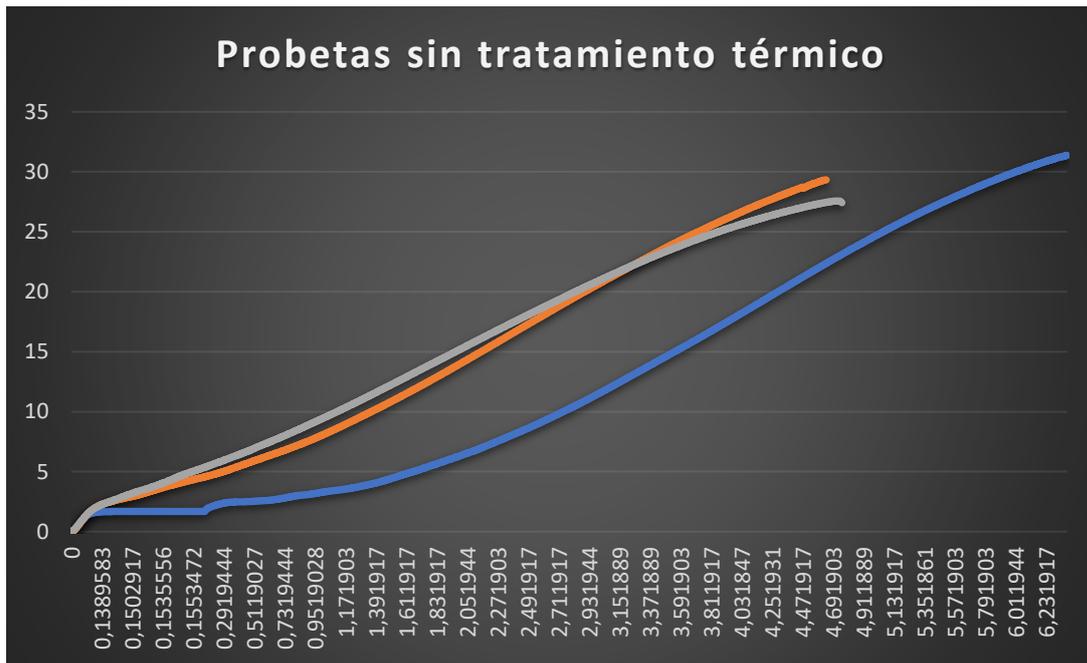
Ilustración 20 Mordazas

Cuando realizamos el último paso, la máquina universal de ensayos comienza a generar un esfuerzo de tracción en la probeta hasta su rotura.

En este proyecto, como se ha mencionado anteriormente, se estudiarán 3 probetas en función del tipo de tratamiento térmico aplicado, se aplicará una media entre los 3 resultados y se compararán entre si los distintos tratamientos.

6.6 Resultados

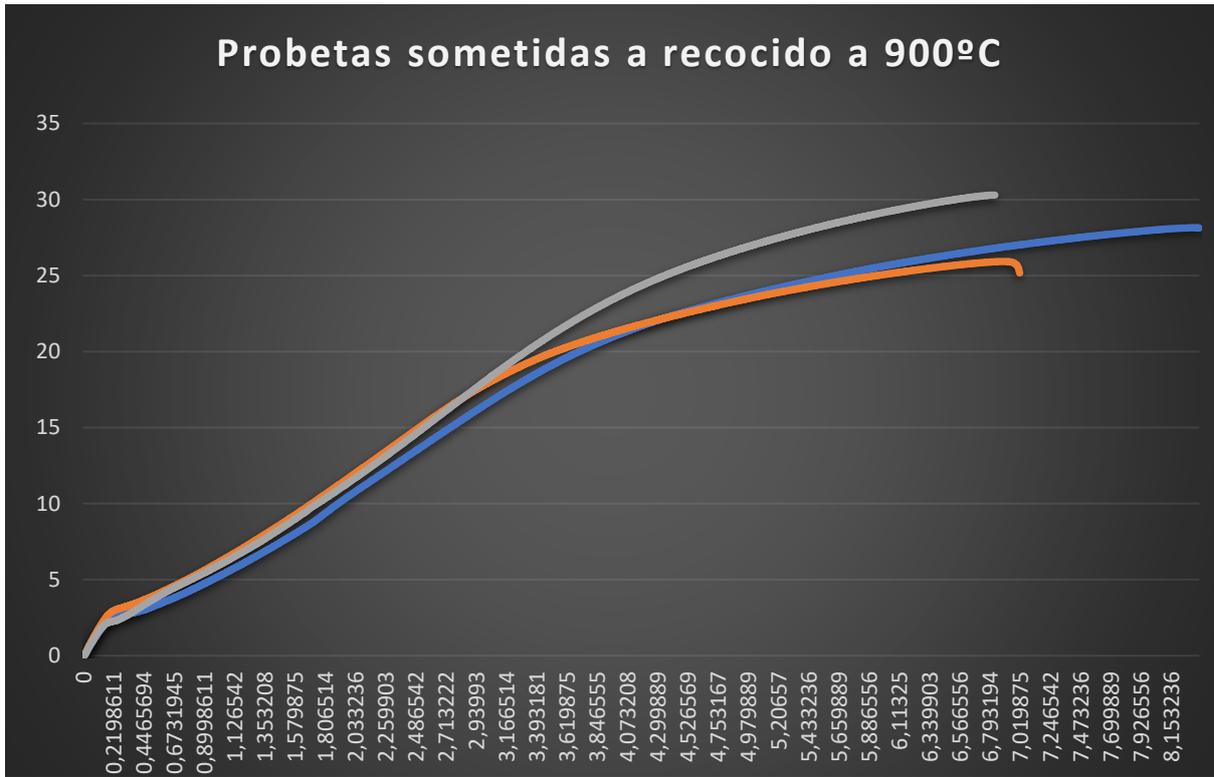
A continuación, se muestran distintas tablas y gráficas en función del tratamiento térmico efectuado.



Gráfica 1 Ensayo a tracción en probetas sin TT

Probeta	Tensión de rotura	Carrera Máxima	Fuerza Máxima	Longitud final
1	381,2 MPa	6,44 mm	31,37 kN	35,1 mm
2	343,7 MPa	5,45 mm	29,32 kN	35 mm
3	330,37 MPa	5,56 mm	27,56 kN	35,1 mm
Media	353,09 MPa	5,81 mm	29,42 kN	35,06 mm

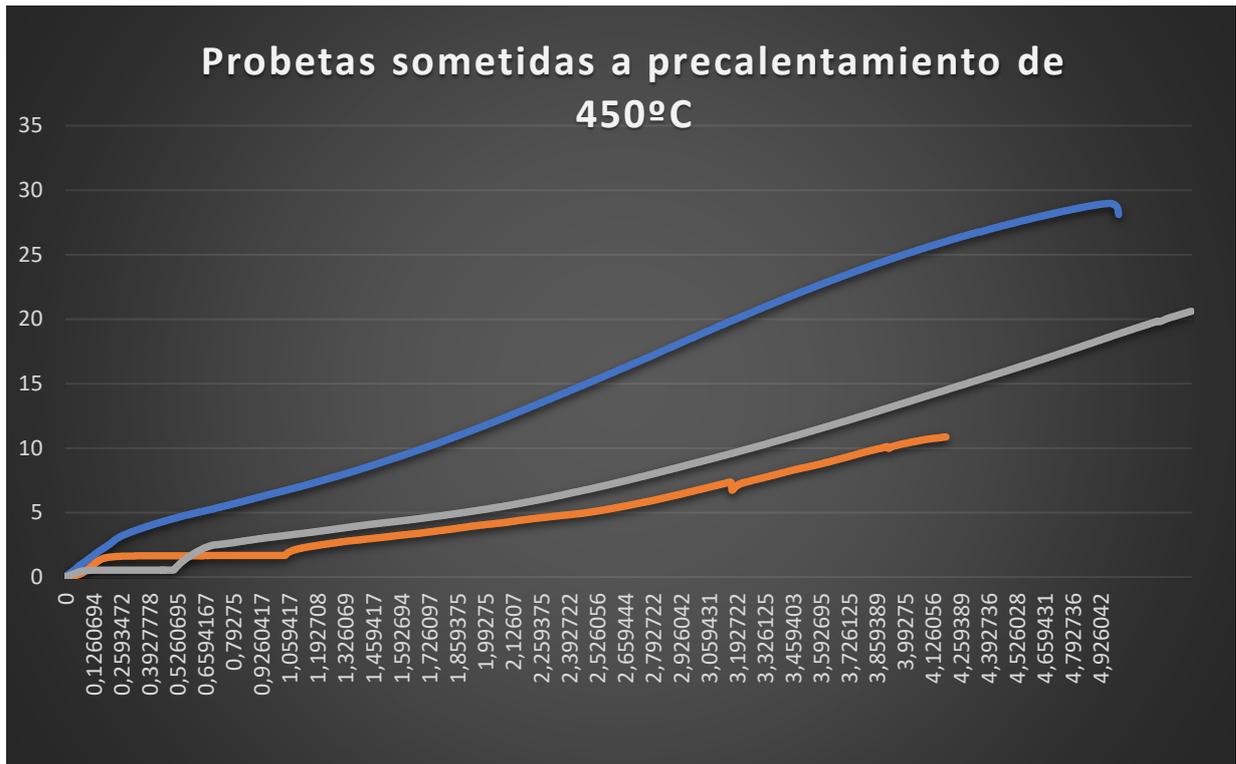
Tabla 1 Resultados ensayo de tracción sin TT



Gráfica 2 Ensayo a tracción en probetas con recocido a 900 °C

Probeta	Tensión de rotura	Carrera Máxima	Fuerza Máxima	Longitud final
1	363 MPa	6,9 mm	30,291 kN	35,1 mm
2	337,19 MPa	8,45 mm	28,138 kN	35 mm
3	310,6 MPa	7,03 mm	25,91 kN	35,1 mm
Media	336,93 Mpa	7,46 mm	28,113 kN	35,07 mm

Tabla 2 Resultados ensayo de tracción con recocido



Gráfica 3 Ensayo a tracción en probetas con precalentamiento a 450°C

En este ensayo la probeta 2 se descarta por estar fuera de rango

Probeta	Tensión de rotura	Carrera Máxima	Fuerza Máxima	Longitud final
1	246,98 MPa	4.94 mm	30,84kN	35,1 mm
2	130,22 MPa	3,44 mm	10,867 kN	35 mm
3	347,2 MPa	5,02 mm	28,973 kN	35,1 mm
Media	297,09 Mpa	4,98 mm	29,90 kN	35,01 mm

Tabla 3 Resultados ensayo de tracción precalentamiento

7. ENSAYO TRIBOLÓGICO

Se conoce como tribología a la ciencia tecnológica que estudia la interacción de las superficies en movimiento relativo. Además, también abarca todos los problemas que surgen a raíz de la misma.

Para ello, la tribología se rige por tres fenómenos fundamentales: la fricción entre dos cuerpos en movimiento, el desgaste derivado de dicha fricción y la lubricación como método para contrarrestar este desgaste.

Por tanto, podemos definir que el objetivo principal de la tribología aplicada a la ingeniería es la de aumentar la vida útil de las máquinas, a través de disminuir la fricción y el desgaste entre sus componentes. De esta manera se reducen los gastos en materiales, energía y tiempo.

Si se enfoca la tribología dentro del estudio propuesto en este trabajo final de grado, esta ciencia permitirá conocer, mediante un ensayo tribológico simple, que tratamiento térmico mejorará las condiciones iniciales de la aleación dúctil.

7.1 Método empleado y equipo

Para la realización de este ensayo de desgaste se ha utilizado un tribómetro pin on disk conectado a un ordenador, el cual mediante un software permite conocer diversos parámetros de medición.



Ilustración 21 Tribómetro

El pin se basa en una estructura móvil la cual consta de una punta redonda a la cual se le somete a una carga axial, concretamente a una pesa de 10 kg. Esta estructura toca directamente de manera perpendicular con la probeta a analizar, la cual está amarrada a un disco circular plano que gira de manera constante.

7.2 Sistema de actuación

El primer paso para realizar el ensayo tribológico consiste en la calibración del brazo y su distancia al disco.

Para ello, mediante el software de la máquina, posicionaremos el brazo en 0 mm respecto al eje y se le dará un radio de giro de 5 mm.

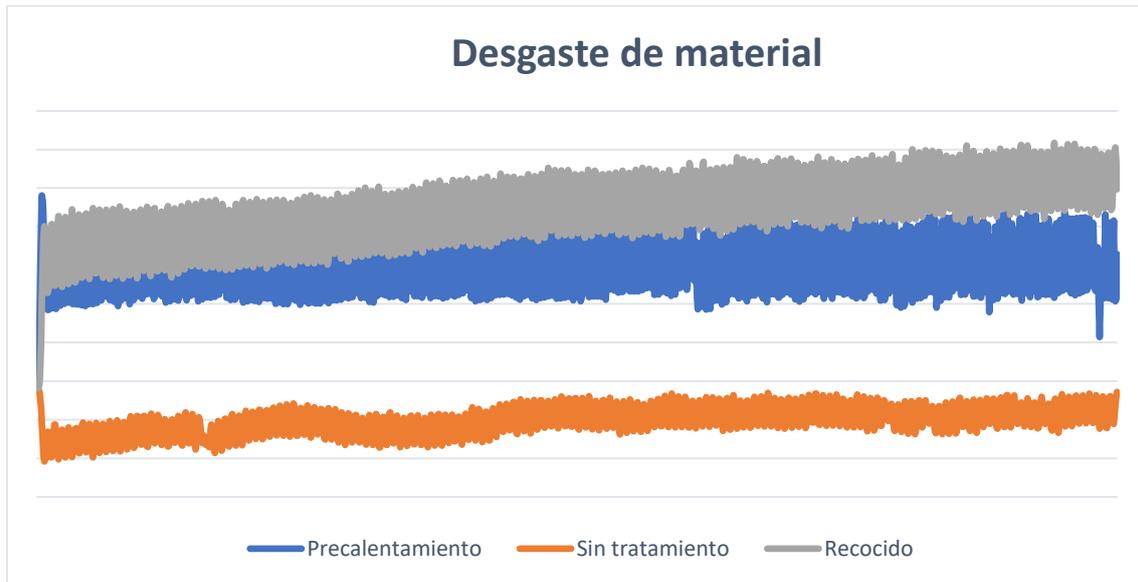
A continuación, se calibra la velocidad de giro, la carga axial que se va a aplicar y el tiempo del ensayo en función de los metros recorridos por el disco.

Una vez configurado todo el software se procede a amarrar la probeta a analizar, se coloca el pin en contacto con la misma, y se busca la superficie a analizar. En este caso se ha escogido parte del radio de la soldadura y de metal base.



Ilustración 22 Amarre Pin on Disk

7.3 Resultados



Los resultados obtenidos en el ensayo nos muestran que, durante el mismo tiempo de contacto, la fundición a la que se le ha aplicado un recocido presenta un desgaste mayor, puesto que es más dúctil.

Por otra parte, la probeta a la cual no se le ha sometido a ningún tratamiento térmico, es la que menor desgaste sufre, ya que es la más dura y entre ambos tratamientos se encuentra el precalentamiento a 450 grados, ya que tiene una ductilidad intermedia.

Los datos obtenidos son orientativos, con el fin de observar y justificar que cuanto mayor dureza presente el material, en las mismas condiciones, menor será su desgaste.



Ilustración 23 Probetas sometidas a ensayo tribológico

8. MICROGRAFÍA

8.1 Metalografía

La metalografía es la ciencia que estudia la estructura de un metal, mediante diversas técnicas, la cual la relaciona con sus propiedades, ya sean mecánicas, físicas o químicas.

Este ensayo es un buen complemento al resto de métodos, puesto que permite conocer el tamaño y la forma del grano del material de estudio. Tanto el tamaño como la forma del grano influyen significativamente en las propiedades mecánicas como la dureza, la resistencia a fatiga y tracción.

Para ello, se analiza al microscopio una probeta pulida y embutida del material en cuestión y se le ataca con un reactivo. Puesto que cada componente del material tiene una velocidad de reacción distinta, los componentes que hayan sido menos atacados con el reactivo, se reflejarán en el microscopio con mas brillo, es decir, mas claros. Aquellos componentes a los cuales el reactivo les haya producido un ataque mayor, aparecerán al microscopio con un color más oscuro.

De esta manera se podrá diferenciar cada constituyente metalográfico, así como sus diferentes tamaños de grano.

8.2 Sistema de actuación

Para una buena ejecución del método y poder realizar un análisis microscópico correcto el material a analizar debe presentar un buen acabado. Es decir, es necesario eliminar cualquier imperfección a nivel macroscópico para que el resultado de la micrografía sea óptimo.

8.2.1 Extracción de la muestra

Para realizar un ensayo microscópico es necesario extraer una muestra del material que se desea analizar.

Debido a que las probetas de material son demasiado grandes, es necesario realizar un corte el cual englobe todas las secciones a estudiar. Las zonas que son de interés son el

cordón de la soldadura, la zona de transición entre la soldadura y el metal base y, la zona de metal base.

Estas muestras se han cortado mediante el mismo procedimiento de corte que las probetas. Es decir, se ha utilizado la sierra de accionamiento manual refrigerada con taladrina ya que es la opción más efectiva.

8.2.2 Montaje de la probeta

El montaje de la probeta se basa en el empleo de materiales plásticos termoendurecibles los cuales se moldean con la probeta en su interior mediante una máquina de embutición.

El compuesto termoendurecible que se ha utilizado es el polimetil metacrilato, el cual se conoce como Transoptic.



Ilustración 24 Compuesto termoendurecible

Por otro lado, la máquina de embutir con la que se ha realizado el montaje de la probeta es una LaboPress3 de la marca Struers.



*Ilustración 25 Máquina de embutición
Struers*

Para la obtención de la muestra, se utiliza un porta piezas el cual se introducirá en la embutidora. Se ha de tener en cuenta que la cara que se va a someter al estudio ha de estar hacia abajo en la embutidora.

A continuación, una vez introducida la muestra, se aplica la cantidad suficiente de compuesto para cubrir la pieza. En este caso con un par de cucharadas ha sido suficiente.

Con la pieza cubierta y la máquina cerrada comienza el proceso de calentamiento. Este proceso dura unos 7 minutos. Posteriormente se somete a la muestra a una fuerza de 15 kN y se deja enfriar completamente.

Una vez finalizado el proceso se habrá obtenido un cubilete transparente, cuya cara a analizar está completamente enrasada.

8.2.3 Desbaste

El proceso de desbaste tiene como objetivo eliminar material sobrante de la muestra a analizar.

Dicho método puede realizarse manualmente, colocando un papel de lija sobre una superficie plana y, posteriormente pasando la muestra sobre el mismo o mediante una desbastadora.

La desbastadora consiste en un disco metálico que gira a velocidad constante, el cual tiene un papel de lija pegado. Las ventajas que proporciona la desbastadora frente al proceso manual, es la rapidez con la que se desbasta la probeta, ya que se puede regular la velocidad de giro.

En el caso de estudio, se ha utilizado una desbastadora Labopol-21 de la marca Struers y dos papeles de lija. De 200 de grano para desbasta las partes más gruesas y de 1000 de grano para el apurado final de las rayas mas finas.



Ilustración 26 Desbastadora Struers

El proceso de desbaste termina cuando la cara de la muestra queda plana con unas rayas finas en la superficie generadas por la ultima pasada de la lija de mayor grano.

8.2.4 Pulido

El proceso de pulido se realiza para mejorar el acabado mediante la eliminación de las rayas que ya no se pueden eliminar a través del desbaste.

Para ello se utiliza la misma desbastadora que en el proceso de desbaste, pero con un paño de pulido al cual se le añade pasta de diamante con granos de 3 y 1 μm .

8.2.5 Ataque

El último paso antes de observar la estructura microscópica de la fundición se conoce como ataque. Existen diversos tipos de ataque, aunque, generalmente, el más utilizado es el ataque químico. De esta manera se podrán apreciar los componentes que forman la fundición nodular.

El ataque consiste en sumergir la muestra en un reactivo unos segundos, con la cara a analizar hacia arriba.

Posteriormente se lava la probeta y se enjuaga con alcohol. Una vez limpia se seca mediante una corriente de aire caliente.

Si sobreatacamos la muestra, debido a que se expone más tiempo del indicado en el reactivo, pueden aparecer manchas y tapar la estructura.

De esta manera, puesto que los componentes del material tienen distinta velocidad de disolución en el reactivo, se mostrarán en diferentes tonalidades en el microscopio.

Los componentes que son atacados de manera más rápida, se mostrarán con un color oscuro. Por otro lado, los componentes cuya velocidad de disolución en el reactivo es menor, aparecerán en el microscopio con una tonalidad clara.

El reactivo que se ha utilizado en este ensayo ha sido una mezcla de alcohol y ácido nítrico el cual se conoce comúnmente como Nital.

8.3 Observación microscópica

Para analizar la microestructura de las muestras, la diferencia de las mismas en función de la zona de ensayo, y el tamaño de grano, se necesita un microscopio adecuado para este tipo de procesos.

En este ensayo se ha utilizado un microscopio metalográfico, mediante el cual con 50x aumentos nos aseguraremos de que el proceso de pulido se ha realizado correctamente y no quedan rayas.

Una vez comprobado, se procede a utilizar la lente de 200x aumentos para observar la microestructura de las probetas de manera detallada.

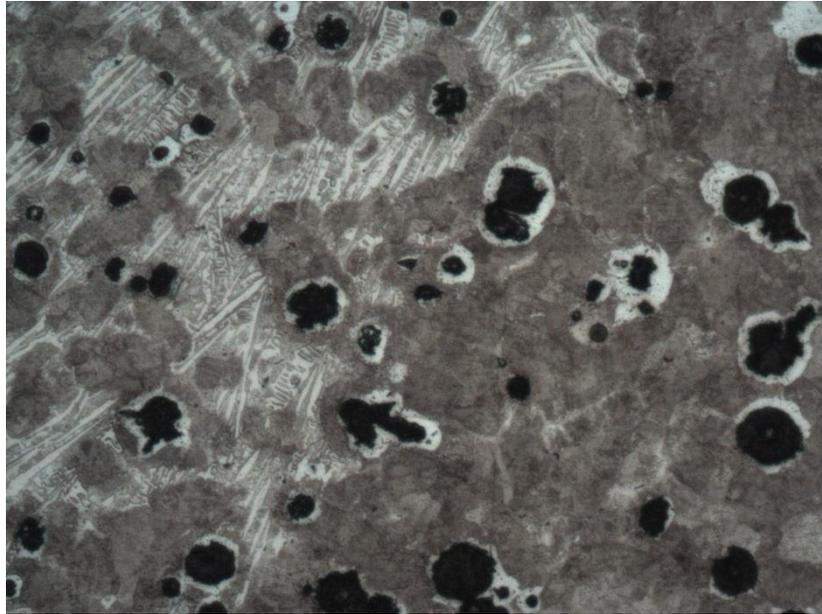
La ventaja que presenta el microscopio utilizado frente a otro tipo de microscopios es que cuenta con un soporte para colocar una cámara y realizar así unas micrográficas precisas y fáciles de ver. La cámara utilizada es el modelo FX35 de la marca Nikon



Ilustración 27 Microscopio metalográfico

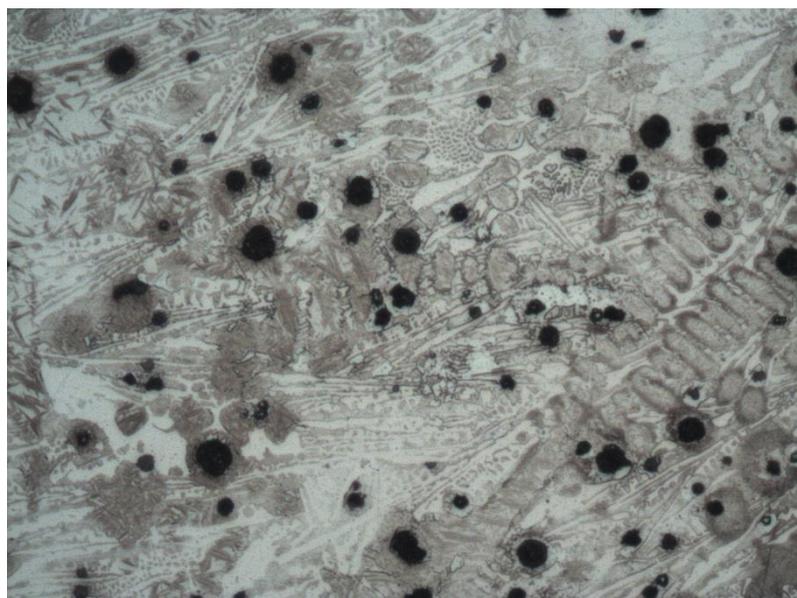
8.4 Resultados

Probeta sin tratamiento térmico ZAC x200



Las formas alargadas de color blanco son ledeburita, la cual presenta una elevada dureza y fragilidad. La zona marrón corresponde a martensita y los granos negros son grafito

Probeta sin tratamiento térmico interfase x200



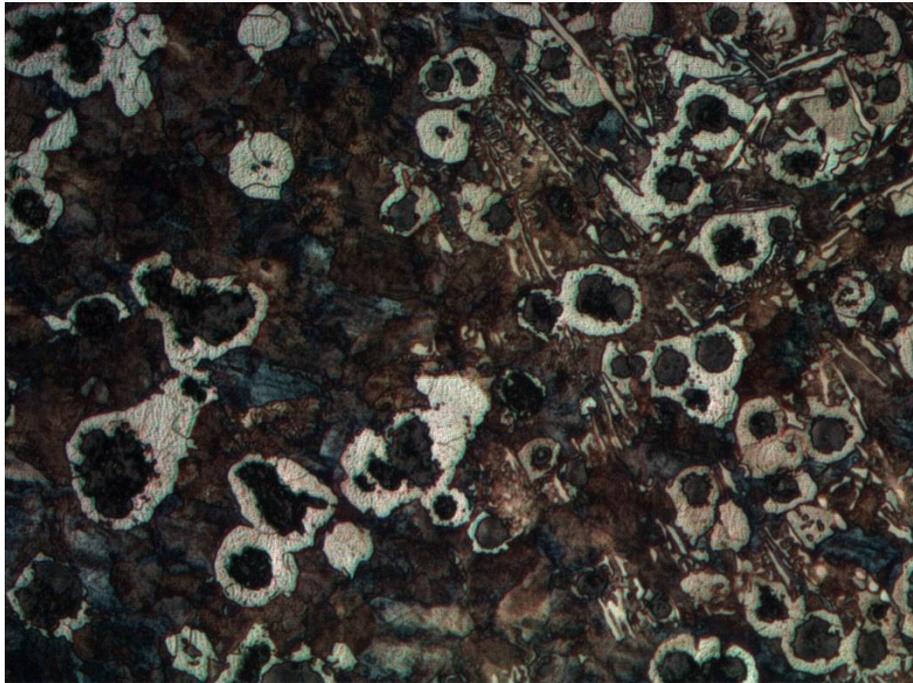
En la interfase nos encontramos con una estructura semejante a la de la fundición Ni-Hard, la cual se caracteriza por ser muy dura, con nódulos de grafito debido a la mezcla de la fundición con el Níquel.

Probeta sin tratamiento térmico soldadura x200



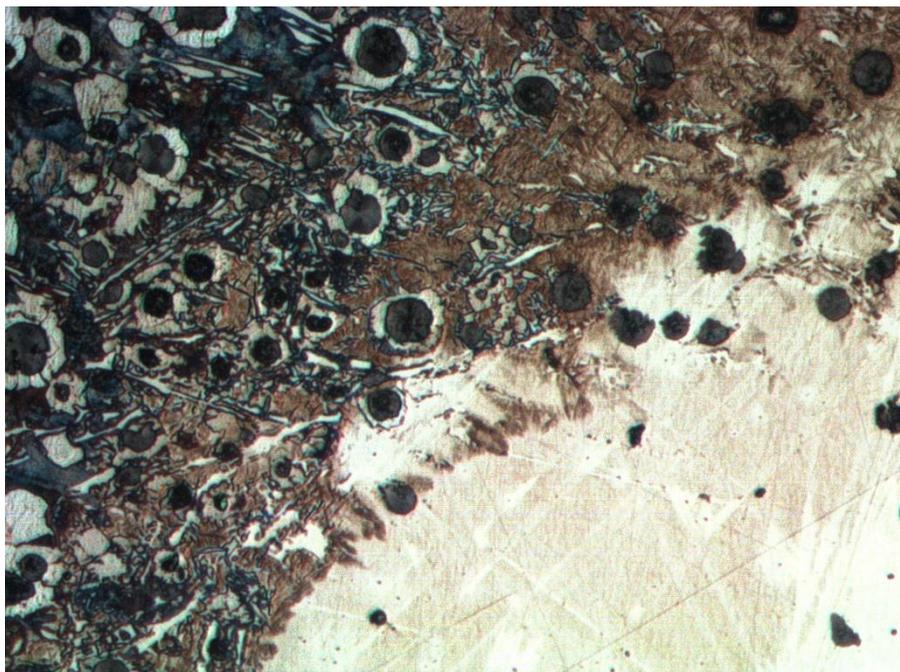
Estructura básica de Aleación Fe-Ni con algunos carburos y grano austenítico dendrítico casi no visible.

Probeta con precalentamiento a 450 °C metal base x200



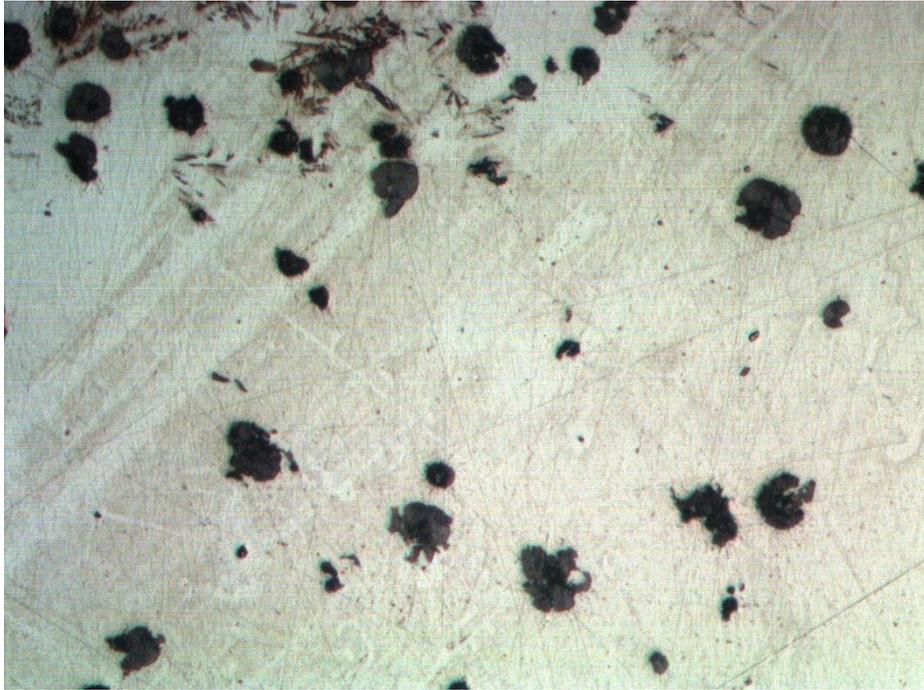
La parte izquierda de la imagen corresponde al metal base. En esta zona se aprecian nódulos de grafito rodeados de un halo de ferrita en matriz martensítica.

Probeta con precalentamiento a 450°C interfase x200



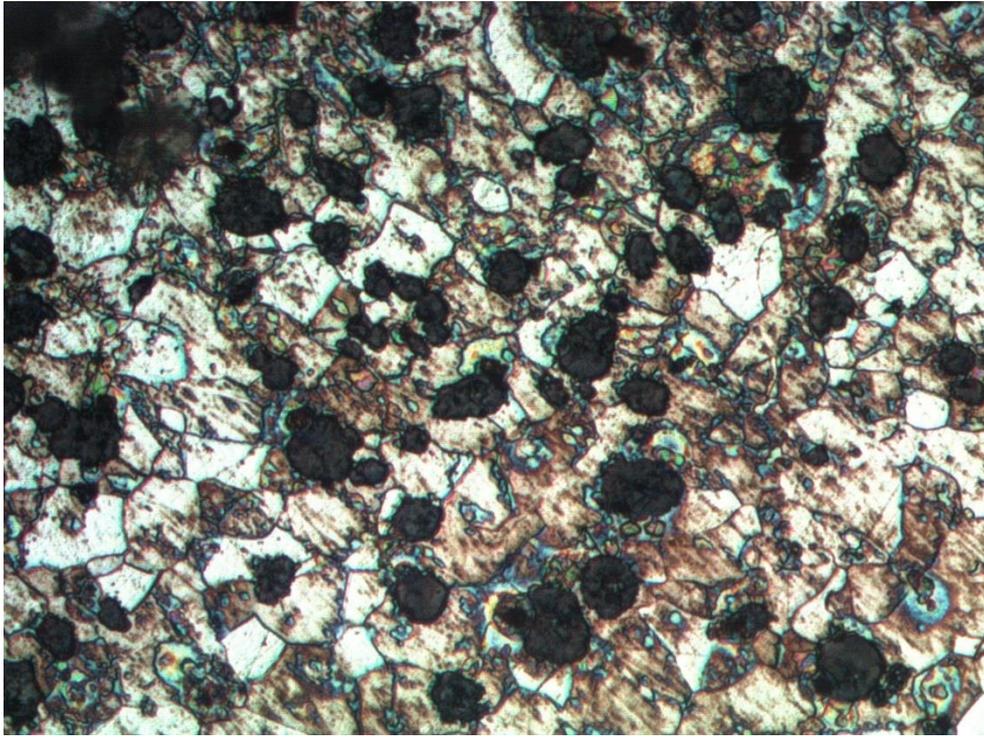
En la interfase nos encontramos nódulos de grafito con halo de ferrita, ledeburita y martensita

Probeta con precalentamiento a 450°C soldadura x200



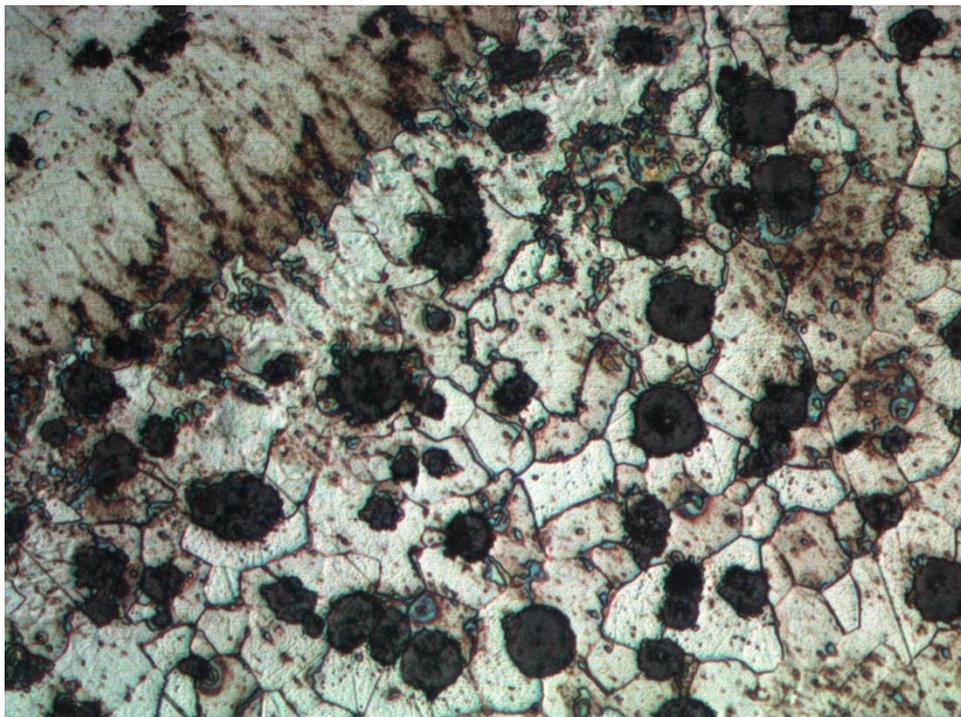
Estructura básica de Aleación Fe-Ni con algunos carburos y grano austenítico dendrítico casi no visible.

Probeta sometida a recocido a 900 °C metal base x200



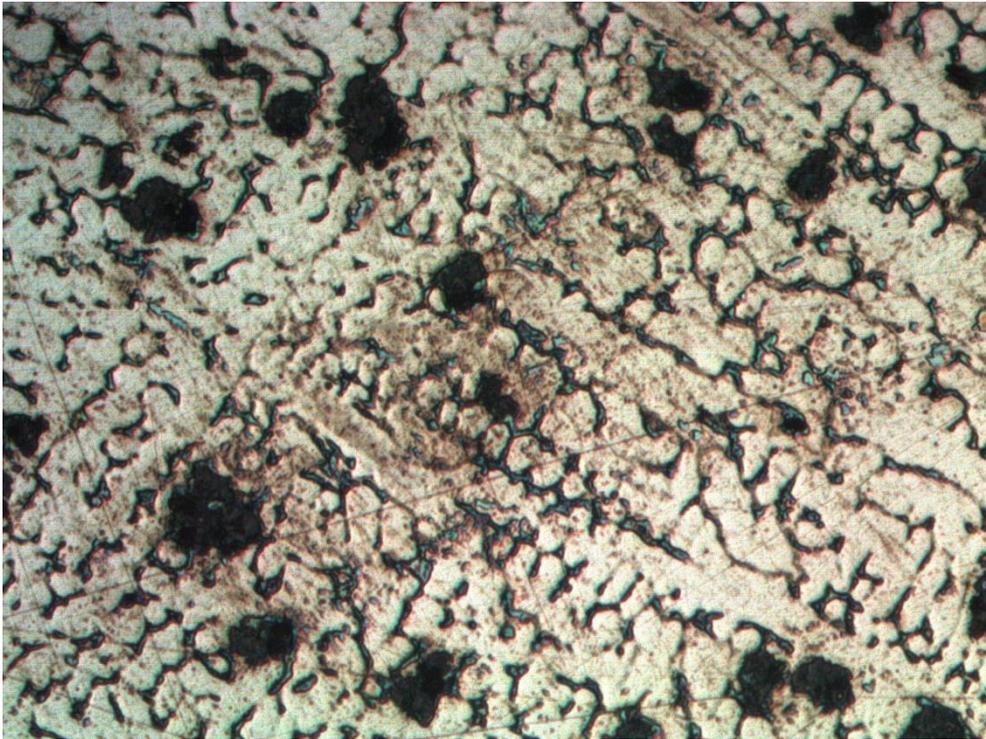
Grafito esferoidal en matriz ferrítica. El recocido elimina la matriz perlítica lo que hace el material muy dúctil

Probeta sometida a recocido a 900°C interfase x200



Interfase sin estructuras duras. Transición brusca de la fundición de matriz ferrítica al metal del cordón Fe-Ni

Probeta sometida a recocido a 900°C soldadura x200



Estructura dendrítica de la aleación Ni-Fe del cordón, con nódulos de grafito debido al carbono disuelto por dilución (mezcla del metal de aporte con el metal base al fundirse ambos)

9. CONCLUSION

Una vez finalizados los diversos ensayos en la soldadura de fundición dúctil con aporte de varilla Fe-Ni 60% se puede llegar a la conclusión de que a medida que se aumenta la temperatura de tratamiento del metal base, este aumenta su ductilidad y por tanto disminuye su dureza.

Es decir, dependiendo del ámbito de aplicación el tratamiento el cual hay que aplicar en la soldadura nodular varía.

Si deseamos obtener un material muy resistente al desgaste sin importar su fragilidad se dejaría el metal base sin aplicarle ningún tratamiento térmico.

Si, por el contrario, el ámbito de aplicación requiere una mayor ductilidad que el metal base y dicho material no se va a someter a un gran desgaste, la mejor opción sería el recocido a 900 °C

Por último, si el objetivo es un material mas dúctil que el metal base y más resistente al desgaste se optaría por precalentar el material a 450°C antes del proceso de soldadura.

10. PLIEGO DE CONDICIONES TÉCNICAS

En el pliego de condiciones técnicas se detalla la maquinaria, normativa y equipos de protección necesarios para la realización del estudio.

10.1 Proceso de soldado de chapas

Maquinaria

1. Soldador TIGMIG 170
2. Banco de trabajo
3. Amoladora angular tipo milhojas
4. Botella de gas argón
5. Sargento

Equipos de protección individual

6. Careta para soldar automática
7. Guantes de protección térmica
8. Botas de seguridad
9. Mandil
10. Polainas

Normativa

11. Se ha seguido la norma ASTM A380 para soldadura de aceros inoxidable
12. Se ha seguido la norma EN292 para la protección facial en la soldadura

10.2 Proceso de corte de piezas

Maquinaria

13. Sierra de accionamiento manual
14. Tornillo de banco

Equipos de protección individual

15. Guantes
16. Gafas de protección
17. Botas de seguridad

Normativa

18. Se ha seguido la norma NTP 153 para el uso de cizallas

10.3 Ensayo de tracción

Maquinaria

19. Maquina de ensayos de tracción Ibertest
20. Mordazas

Equipos de protección individual

21. Guantes
22. Gafas de protección
23. Botas de seguridad

Normativa

24. Se ha seguido la norma ASTM E8 para ensayos de tracción

10.4 Ensayo tribológico

Maquinaria

25. Tribómetro pin on disk

26. Sargento

Equipos de protección individual

27. Guantes

28. Gafas de protección

29. Botas de seguridad

Normativa

30. Se ha seguido la norma ASTM G-99 para ensayos de tribología`

10.5 Micrografías

Maquinaria

31. Sierra de accionamiento manual

32. Embutidora Struels Labopress-3

33. Compuesto Transoptic

34. Desbastadora Struels Labopol-21

35. Hoja de lija de grano 200 y 1000

36. Secador

37. Microscopio

38. Pasta de diamante 3 μ m

39. Alcohol etílico

40. Ácido oxálico

41. Equipo para ataque electrolítico

Equipos de protección individual

42. Guantes

43. Gafas de protección

44. Botas de seguridad

Normativa

45. Se ha seguido la norma UNE-EN ISO 643:2013 para determinación de tamaño de grano en metales

11. PRESUPUESTO

11.1 Materiales

Nº	UNIDADES	CANTIDAD	ELEMENTO	PRECIO UNITARIO	TOTAL
1	UDS	8	CHAPAS DE FUNDICION DUCTIL	10 €	80 €
2	UDS	5	VARILLA FE-NI 60%	4 €	20 €
3	UDS	1	VARILLA TUNGSTENIO	5 €	5 €
4	L	20	GAS ARGÓN	11 €	220 €
5	UDS	1	DISCO DESBASTE	5 €	5 €
6	UDS	1	DISCO PULIDO	15 €	15 €

7	L	1	ALCOHOL ETÍLICO	3 €	3 €
8	L	1	TALADRINA	5 €	5 €
9	L	1	CLORURO FÉRRICO	18 €	18 €
10	L	1	ÁCIDO OXÁLICO	15 €	15 €
TOTAL MATERIALES					386 €

11.2 Maquinaria

Nº	UNIDADES	CANTIDAD	MAQUINA	PRECIO UNITARIO	TOTAL
1	H	3	EQUIPO SOLDADURA	50 €	150 €
2	H	1	AMOLADORA ANGULAR	10 €	10 €
3	H	2,5	MAQUINA ENSAYO A TRACCIÓN	50 €	125 €

4	H	2	TRIBOMETRO	50 €	100 €
5	H	2	MICROSCOPIO	30 €	60 €
6	H	1	SIERRA MANUAL DE DISCO	50 €	50 €
TOTAL MAQUINARIA					495 €

11.3 Mano de obra

Nº	UNIDADES	CANTIDAD	MAQUINA	PRECIO UNITARIO	TOTAL
1	H	1	PREPARACIÓN EQUIPO SOLDADURA	50 €	50 €
2	H	4	SOLDADURA	60 €	240 €
3	H	1	DESBASTE	50 €	50 €
4	H	1	CORTE DE PIEZAS	50 €	50 €

5	H	1	PREPARACION ENSAYO TRACCIÓN	60 €	60 €
6	H	1,5	ENSAYO DE TRACCIÓN	50 €	75 €
5	H	1	PREPARACION ENSAYO TRIBOLOGICO	50 €	50 €
6	H	1,5	ENSAYO TRIBOLOGICO	60 €	90 €
7	H	3	PREPARACION PROBETAS MICROGRAFÍA	50 €	150 €
8	H	1	ESTUDIO MICROSCOPICO	70 €	70 €
TOTAL MANO DE OBRA					885 €

El presupuesto total del proyecto asciende a mil setecientos sesenta y seis euros.

12. BIBLIOGRAFIA

- Ingeniería de Manufactura (citado Febrero 2019)
<http://www.uca.edu.sv/facultad/clases/ing/m210034/doc4.pdf>
- Tipos de soldadura (citado Febrero 2019)
<http://www.gnccaldereria.es/tipos-de-soldadura/>
- Tipos de soldadura (citado Febrero 2019)
<http://www.demaquinasyherramientas.com/soldadura/cuales-son-los-diferentes-tipos-de-soldadura>
- Fundición nodular (citado Febrero 2019)
https://www.ecured.cu/Fundici%C3%B3n_nodular
- Fundición nodular y sus características (citado Febrero 2019)
<http://cienciaymateriales.blogspot.com/2013/04/92-fundicion-nodular-caracteristicas.html>
- La tribología: ciencia y técnica para el mantenimiento de Francisco Martínez (citado Febrero 2019)
- Ensayo de tracción (citado Febrero 2019)
<https://www.areatecnologia.com/materiales/ensayo-de-traccion.html>