



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

**VIABILIDAD DE LA SOLDADURA DE
FUNDICIÓN DÚCTIL POR
PROCEDIMIENTO TIG Y APORTE ER
DE AISI 316L, PARA SOLUCIÓN DE
PROBLEMAS SURGIDOS EN PIEZAS
PARA BASTIDORES DE GRANDES
CAMIONES, BOMBAS HIDRÁULICAS Y
VÁLVULAS DE CONDUCCIÓN DE AGUA**

Trabajo Final de Grado de Ingeniería Mecánica

Curso 2019/2020

Alumna: Lydia Romero Lambea
Tutor: Manuel Pascual Guillamón
Cotutor: Fidel Salas Vicente

INDICE GENERAL

1. OBJETO	8
2. INTRODUCCIÓN	9
3. MATERIALES	13
3.1. CHAPAS.....	13
3.1.1. FUNDICIÓN LAMINAR.....	13
3.1.2. FUNDICIÓN NODULAR.....	14
3.2. VARILLAS DE APORTE.....	14
4. TRATAMIENTOS TÉRMICOS	16
4.1. TEMPLE.....	17
4.1. NORMALIZADO.....	18
4.1. RECOCIDO.....	18
4.1. REVENIDO.....	19
5. UNIÓN DE CHAPAS	20
5.1. SOLDADURA.....	20
5.1.1. SOLDADURA FUERTE.....	20
5.1.2. SOLDADURA BLANDA.....	21
5.1.3. SOLDADURA EN ESTADO SÓLIDO.....	21
5.1.4. SOLDADURA POR FUSIÓN.....	22
5.2. MÉTODO Y EQUIPO EMPLEADO.....	27
5.3. PROCEDIMIENTO DE SOLDEO.....	28
5.3.1. MATERIAL DE PROTECCIÓN.....	28
5.3.2. CORTE CHAPA INICIAL.....	28
5.3.3. PREPARACIÓN DE LAS PIEZAS.....	29
5.3.4. REGULACIÓN DEL EQUIPO.....	30
5.3.5. AMARRADO Y PUNTEADO.....	30
5.3.6. CORDÓN DE SOLDADURA.....	30
5.3.7. ACABADO.....	31
5.4. DEFECTOS EN LA SOLDADURA.....	31
5.4.1. FUSIÓN INCOMPLETA.....	32
5.4.2. MORDEDURAS.....	33
5.4.3. FALTA DE PENETRACIÓN.....	33



5.4.4. POROSIDAD O CAVIDAD	34
5.4.5. GRIETAS.....	34
5.4.6. INCLUSIONES SÓLIDAS	35
5.5. RESULTADO FINAL.....	35
6. CORTE DE PROBETAS PARA ANÁLISIS Y ENSAYOS.....	38
7. ENSAYO DE MICROGRAFÍA	39
7.1. PROCEDIMIENTO DE PREPARACIÓN PARA LAS MUESTRAS	39
7.1.1. EMBUTICIÓN.....	39
7.1.2. PULIDO	41
7.1.3. ATAQUE	42
7.2. OBSERVACIÓN EN EL MICROSCOPIO.....	43
7.3. RESULTADOS	44
7.3.1. PROBETA PRECALENTADA A 450°C.....	44
7.3.2. PROBETA SIN TRATAMIENTO TÉRMICO	46
7.3.3. PROBETA CON TRATAMIENTO TÉRMICO RECOCIDO A 900°C	48
8. ENSAYO DE DUREZA.....	51
8.1. MÉTODO Y EQUIPO EMPLEADO	51
8.2. PROCEDIMIENTO	52
8.3. RESULTADOS	53
8.3.1. PROBETA CON PRECALENTAMIENTO A 450°C.....	54
8.3.2. PROBETA SIN TRATAMIENTO TÉRMICO	54
8.3.3. PROBETA CON TRATAMIENTO TÉRMICO RECOCIDO A 900°C	55
8.3.4. COMPARACIÓN DE LAS PROBETAS EN CADA ZONA.....	55
9. ENSAYO DE TRACCIÓN.....	57
9.1. EQUIPO EMPLEADO	61
9.2. PROCEDIMIENTO	62
9.3. RESULTADOS.....	62
9.3.1. PROBETA CON PRECALENTAMIENTO A 450°C.....	63
9.3.2. PROBETA SIN TRATAMIENTO TÉRMICO	64
9.3.3. PROBETA CON TRATAMIENTO TÉRMICO RECOCIDO A 900°C	65
9.3.4. COMPARACIÓN DE LAS PROBETAS EN CADA ZONA.....	66
10. ENSAYO DE CORROSIÓN.....	67
10.1. MÉTODO Y EQUIPO EMPLEADO	67



10.2. RESULTADOS	68
11. PLIEGO DE CONDICIONES TÉCNICAS.....	70
11.1. UNIÓN DE CHAPAS.....	70
11.2. CORTE DE PROBETAS PARA ANÁLISIS Y ENSAYOS	70
11.3. ENSAYO DE MICROGRAFÍA.....	71
11.4. ENSAYO DE DUREZA.....	71
11.5. ENSAYO DE TRACCIÓN.....	72
11.6. ENSAYO DE CORROSIÓN	72
12. CONCLUSIÓN	73
13. PRESUPUESTO	75
13.1. MATERIALES (A).....	75
13.2. MAQUINARIA EMPLEADA (B).....	75
13.3. MANO DE OBRA (C)	76
13.4. PRESUPUESTO TOTAL	76
14. BIBLIOGRAFÍA.....	77

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Diagrama Hierro-Carbono	9
Ilustración 2. Micrografía ferrita.....	10
Ilustración 3. Micrografía austenita.....	10
Ilustración 4. Micrografía cementita	11
Ilustración 5. Micrografía perlita.....	11
Ilustración 6. Micrografía ledeburita y ledeburita transformada	12
Ilustración 7. Fundición laminar.....	13
Ilustración 8. Fundición nodular.....	14
Ilustración 9. Varilla de aporte 316L	15
Ilustración 10. Tratamientos térmicos en función de la temperatura y el tiempo	16
Ilustración 11. Diagrama curvas TTT.....	17
Ilustración 12. Micrografía martensita.....	18
Ilustración 13. Soldadura por rayo láser	23
Ilustración 14. Soldadura por gas.....	24
Ilustración 15. Soldadura por resistencia.....	25
Ilustración 16. Soldadura SMAW.....	26
Ilustración 17. Soldadura GMAW	26
Ilustración 18. Soldadura TIG.....	26
Ilustración 19. Antorcha TIG desmontada	27
Ilustración 20. Equipo soldador TRANSTIG 1700	28
Ilustración 21. Dimensiones chapa a soldar	28
Ilustración 22. Sierra de cinta con accionamiento manual	29
Ilustración 23. Ángulo de chaflán y talón de raíz	29
Ilustración 24. Colocación de las chapas a soldar en V.....	30
Ilustración 25. Orden del punteado.....	30
Ilustración 26. Cordón de soldadura	31
Ilustración 27. Defectos en la soldadura.....	32
Ilustración 28. Fusión incompleta	33
Ilustración 29. Mordedura.....	33
Ilustración 30. Falta de penetración.....	34
Ilustración 31. Porosidad.....	34

Ilustración 32. Grietas	35
Ilustración 33. Inclusiones sólidas.....	35
Ilustración 34. Resultado final piezas soldadas.....	36
Ilustración 35. Radiografías piezas soldadas	36
Ilustración 36. Tronzadora para metal con refrigeración	38
Ilustración 37. Probetas cortadas para ensayos.....	38
Ilustración 38. Compuesto termoendurecible	39
Ilustración 39. Prensa de montaje en caliente Struers LaboPress-3	40
Ilustración 40. Muestras embutidas	40
Ilustración 41. Máquina de pulido Stuers LaboPol-21.....	41
Ilustración 42. Muestra sumergida en el reactivo	42
Ilustración 43. Reactivo Nital-3.....	42
Ilustración 44. Microscopio Nikon Microphot-FX	43
Ilustración 45. Partes de una soldadura	44
Ilustración 46. Micrografía metal base con precalentamiento a 450°C.....	44
Ilustración 47. Micrografía metal base próximo a la interfase con precalentamiento a 450°C	45
Ilustración 48. Micrografía interfase con precalentamiento a 450°C	45
Ilustración 49. Micrografía cordón de soldadura con precalentamiento a 450°C	46
Ilustración 50. Micrografía metal base sin tratamiento térmico.....	46
Ilustración 51. Micrografía metal base próximo a la interfase sin tratamiento térmico	47
Ilustración 52. Micrografía interfase sin tratamiento térmico	47
Ilustración 53. Micrografía cordón de soldadura sin tratamiento térmico	48
Ilustración 54. Micrografía metal base con recocido a 900°C	48
Ilustración 55. Micrografía metal base próximo a la interfase con recocido a 900°C	49
Ilustración 56. Micrografía interfase con recocido a 900°C	49
Ilustración 57. Micrografía cordón de soldadura con recocido a 900°C	50
Ilustración 58. Indentador ensayo de dureza Vickers.....	51
Ilustración 59. Microdurómetro INNOVATEST 400A SERIES.....	52
Ilustración 60. Huella ensayo Vickers.....	53
Ilustración 61. Gráfica durezas Vickers en diferentes zonas de la soldadura y con	



diferentes tratamientos térmicos	55
Ilustración 62. Ensayo a tracción	57
Ilustración 63. Diagrama tensión-deformación.....	57
Ilustración 64. Diagrama comparativo de material dúctil y frágil	58
Ilustración 65. Máquina universal de tracción MOHR & FEDERHAFF AG	61
Ilustración 66. Probetas con precalentamiento a 450°C ensayadas a tracción.....	63
Ilustración 67. Probetas sin tratamiento térmico ensayadas a tracción	64
Ilustración 68. Probetas con tratamiento térmico recocido a 900°C ensayadas a tracción	65
Ilustración 69. Diagrama Tensión-Alargamiento para probetas con diferentes tratamientos térmicos	66
Ilustración 70. Balanza analítica y de precisión KERN 770.....	68
Ilustración 71. Probetas corroídas	68
Ilustración 72. Bastidor de un camión.....	74
Ilustración 73. Bomba hidráulica	74
Ilustración 74. Válvulas de conducción de agua	75

INDICE TABLAS

Tabla 1. Composición química 316L (% en peso)	15
Tabla 2. Tipos de soldadura.....	20
Tabla 3. Resultados dureza Vickers con precalentamiento a 450°C.....	54
Tabla 4. Resultados dureza Vickers sin tratamiento térmico.....	54
Tabla 5. Resultados dureza Vickers con tratamiento térmico recocido a 900°C.....	55
Tabla 6. Resultados ensayo a tracción con precalentamiento a 450°C	63
Tabla 7. Resultados ensayo a tracción sin tratamiento térmico	64
Tabla 8. Resultados ensayo a tracción con tratamiento térmico recocido a 900°C....	65
Tabla 9. Pérdida de masa por corrosión	69
Tabla 10. Coste de los materiales empleados	76
Tabla 11. Coste por el uso de la maquinaria empleada.....	76
Tabla 12. Coste de la mano de obra	77
Tabla 13. Coste total.....	77



INDICE ECUACIONES

Ecuación 1. Dureza Vickers	51
Ecuación 2. Módulo de Young	58
Ecuación 3. Tensión de rotura.....	59
Ecuación 4. Coeficiente de Poisson	60
Ecuación 5. Porcentaje de elongación.....	60

1. OBJETO

En el presente Trabajo de Final de Grado analizaremos cómo varía la microestructura y las propiedades mecánicas de tres probetas soldadas con material de aporte. La finalidad de este estudio es seleccionar el método más viable para solucionar los problemas surgidos en piezas a las que se les da un uso determinado; ya que, a día de hoy, el uso de la soldadura para solventar dichas contrariedades sigue siendo un tema pionero y de continuo desarrollo.

Para ello, el material que emplearemos para las chapas que vamos a soldar será de fundición dúctil o nodular. El proceso de soldadura empleado será de tipo TIG (Tungsten Inert Gas) y la varilla de aporte será de acero inoxidable 316L.

El procedimiento que seguiremos será el siguiente:

Inicialmente cortaremos la chapa de grosor 6mm con un ángulo de 30º en la zona que vamos a soldar.

Posteriormente, soldaremos las 3 probetas de la siguiente manera:

La probeta número 1 la precalentaremos a 450°C y, tras la soldadura procuraremos que se enfríe lentamente cubriéndola con un aislante térmico para evitar las tensiones generadas por las dilataciones y las contracciones que se generan en los cambios bruscos de temperatura en las zonas próximas al cordón de soldadura para así conseguir una soldadura sin fractura.

La probeta 2 la soldaremos precalentando previamente a 250°C además de cubrir de nuevo nada más soldar para evitar la fractura al generarse tensiones que se pueden originar por los cambios bruscos de temperatura.

Y la probeta número 3 la soldaremos a 250°C por el mismo motivo que la probeta 2. En este caso haremos un recocido a 900°C y el enfriamiento de la probeta se realizará dentro del horno para que este sea muy lento.

Una vez ya tengamos todas nuestras probetas listas, extraeremos 5 fragmentos de cada una realizando los cortes de la manera más limpia posible con la radial. Estos los emplearemos para observar las diversas micrografías y ensayarlas a tracción, a dureza y a corrosión.

Finalmente, podremos dar pie a la comparación de los resultados obtenidos en los diferentes análisis para así poder hacer las distinciones de cómo le afectan los tratamientos térmicos a la estructura interna del material y a las propiedades mecánicas de los elementos soldados; siendo el material base de la chapa y de la varilla el mismo. De este modo, seremos capaces de hacer las correspondientes distinciones del uso que puede tener cada tipo de soldadura en la industria en función a las prestaciones mecánicas que ofrezcan cada una. Asimismo, podremos asignarle el tratamiento térmico adecuado para solventar problemas surgidos en cada una de las piezas elegidas.

2. INTRODUCCIÓN

Conocemos como fundición al proceso de la obtención de piezas por el proceso de colada en un molde (el cual puede ser desechable o no).

Las fundiciones son aleaciones formadas a base de hierro con un contenido de carbono que oscila entre el 2% y el 4,5% aproximadamente. Además, puede presentar cantidades de silicio entre el 2% y el 4%, de magnesio puede llegar hasta un 1% y pequeñas cantidades de azufre y fósforo.

Las principales características de estas son: no son dúctiles ni maleables, no pueden someterse a deformación plástica, son fáciles de maquinar, duras, y resistentes a la corrosión y al desgaste mecánico.

A continuación adjunto el diagrama en el que se puede ver la franja de composición en carbono de las fundiciones comentada anteriormente para ver los constituyentes que las componen en función a la temperatura.

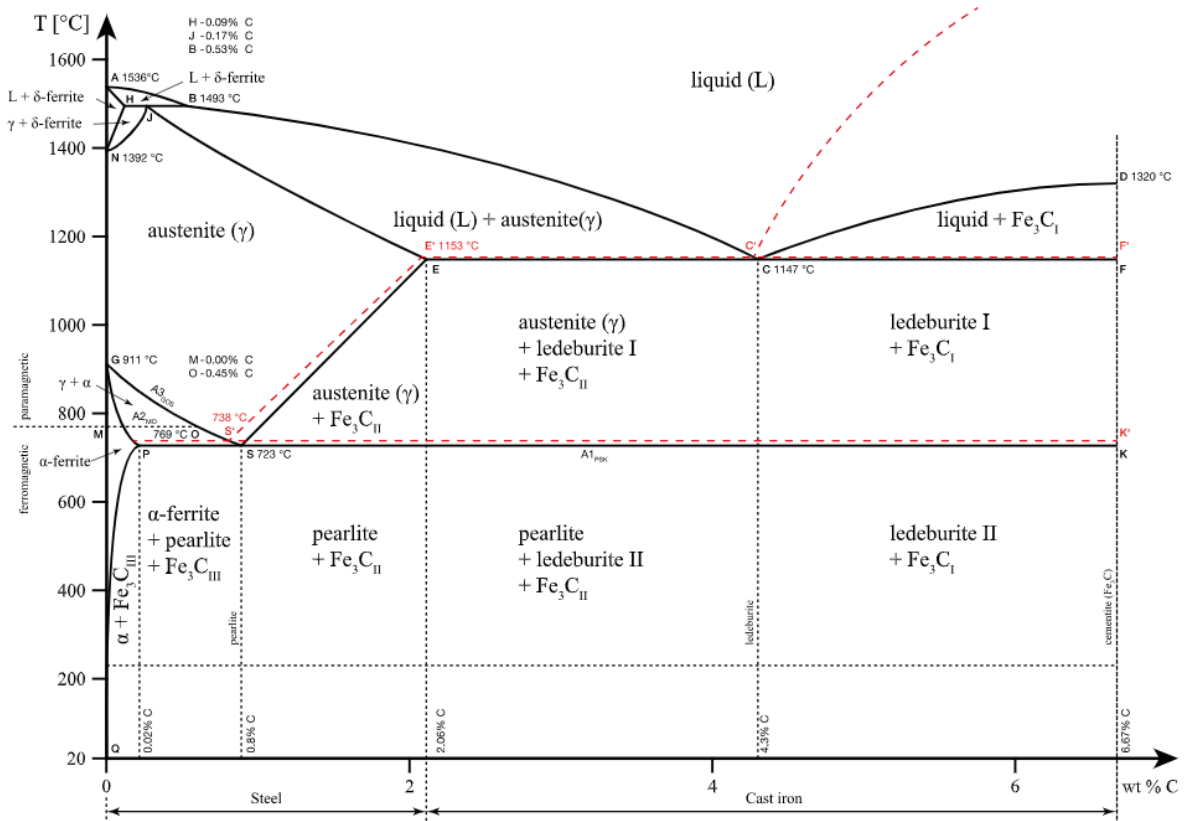


Ilustración 1. Diagrama Hierro-Carbono

Podemos observar que las principales estructuras son la cementita, la austenita, la perlita (ferrita + cementita) y la ledeburita (austenita + cementita). Dichos componentes son los que conforman los aceros y la fundición blanca. En cambio, en la fundición dúctil en vez de cementita encontraremos grafito.

La ferrita ($Fe\alpha$) es el constituyente más blando y resistente al desgaste. La ferrita es la solución sólida de carbono en el hierro puro (alfa), el cual tan solo admite un 0,021% de carbono en solución hasta la temperatura de $723^{\circ}C$ (temperatura de transformación eutécticoide) en el caso de las fundiciones.

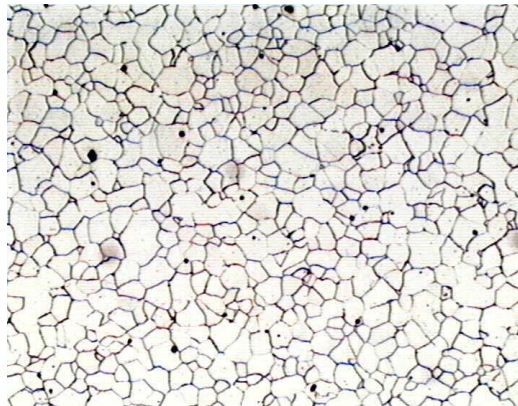


Ilustración 2. Micrografía ferrita

La austenita (γ ó $Fe\gamma$) es el constituyente menos dura pero más resistente al desgaste. Se le llama austenita a la solución sólida del de carbono en el hierro gamma. Como podemos observar en el diagrama, la austenita es estable a temperaturas superiores a $723^{\circ}C$, pero a temperaturas inferiores el hierro no es capaz de solubilizar el carbono y vuelve a convertirse de nuevo en hierro alfa. Esta disminución de temperatura da pie a diferentes microestructuras dependiendo de la velocidad de enfriamiento. Estas las explicaré más adelante, concretamente en el apartado 4. *Tratamientos térmicos*.

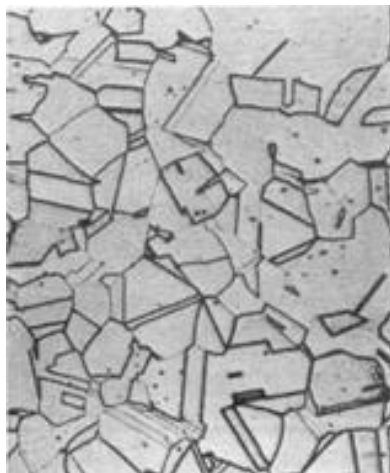


Ilustración 3. Micrografía austenita

La cementita (Fe_3C_{II}) es el constituyente más duro y frágil. La cementita no es una solución sólida del carbono en el hierro como la austenita y la ferrita. En este caso, cada átomo de carbono que no solubiliza la ferrita forma cementita. Además, a medida que aumenta el porcentaje de carbono, también aumenta la concentración de cementita.

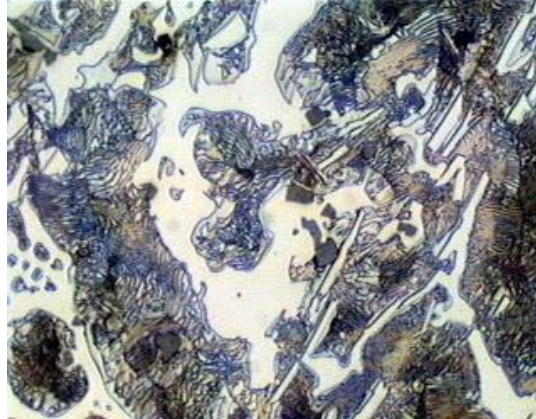


Ilustración 4. Micrografía cementita

La perlita es el constituyente eutectoide formado por láminas claras de ferrita y láminas oscuras de cementita, por lo que sus propiedades serán intermedias al haberle conferido lo blando y dúctil de la ferrita y lo duro y frágil de la cementita. La perlita es el tipo de microestructura que aparece cuando la velocidad de enfriamiento desde 723°C de la austenita es lenta.

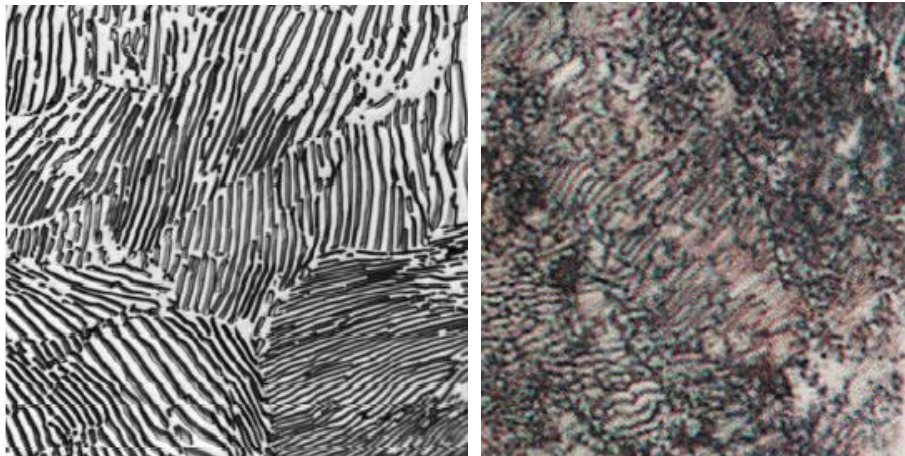


Ilustración 5. Micrografía perlita (más y menos aumentos respectivamente)

La ledeburita es el constituyente eutéctico compuesto por austenita y cementita. Esta se forma durante el enfriamiento de las fundiciones en fase líquida desde la temperatura eutéctica (1130°C) hasta la temperatura eutectoide (723°C), que deja de ser estable y pasa a ser ledeburita transformada; donde la austenita que inicialmente la componía se transforma en perlita dejando así una composición final de perlita y cementita. A pesar de este cambio, se le llama ledeburita transformada porque sigue siendo posible detectar las

zonas donde hubo ledeburita por el aspecto eutéctico que queda en las agrupaciones de perlita (zonas oscuras) y cementita (matriz blanca).

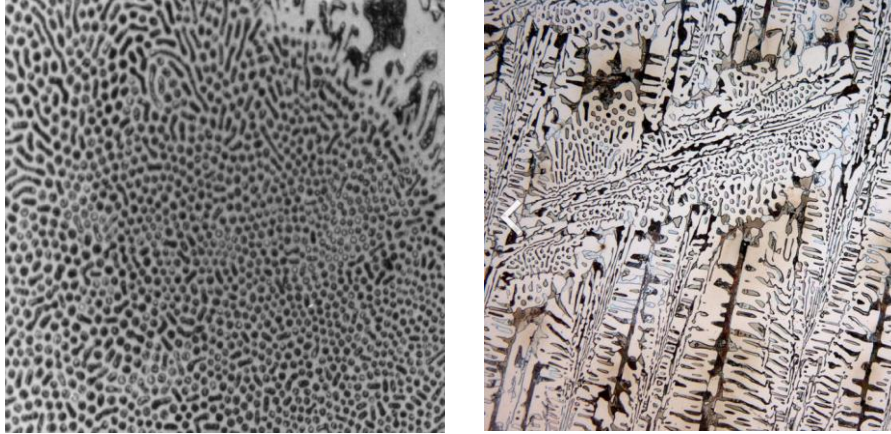


Ilustración 6. Micrografía ledeburita y ledeburita transformada respectivamente

3. MATERIALES

3.1. CHAPAS

Podemos encontrar diferentes tipos de fundición. Entre todas ellas, encontramos la fundición laminar y la fundición nodular. La diferencia entre estas es el aspecto del grafito en su interior, el cual le confiere unas propiedades u otras.

El grafito es una de las formas en que existe el carbono en la naturaleza. Este puede cambiar sus propiedades en función a la estructura molecular que presente y, como ya se ha comentado en el párrafo anterior, de ello depende tener un tipo de fundición u otra.

3.1.1. FUNDICIÓN LAMINAR

La fundición laminar se caracteriza porque el carbono aparece en forma de grafito ya que solidifica según el diagrama estable. Esto se consigue poseyendo un porcentaje superior de silicio, además de tener una lenta velocidad de enfriamiento. El grafito en este tipo de fundición se encuentra en un alto grado en estado libre en forma de escamas o láminas. Su presencia disminuye la dureza, la resistencia a tracción y el módulo de elasticidad y anula casi por completo la ductilidad, plasticidad y tenacidad. A pesar de esto, son fáciles de maquinar, tienen buena resistencia a compresión y al desgaste, amortiguan bien las vibraciones, tienen mucha resiliencia, tienen buena fluidez para el colado y capacidad de templado.

Por lo que, su uso suele ser como bases o apoyos para máquinas, discos de frenos, bastidores para maquinaria pesada, bloques de cilindros para motores, herramientas agrícolas, entre otros.

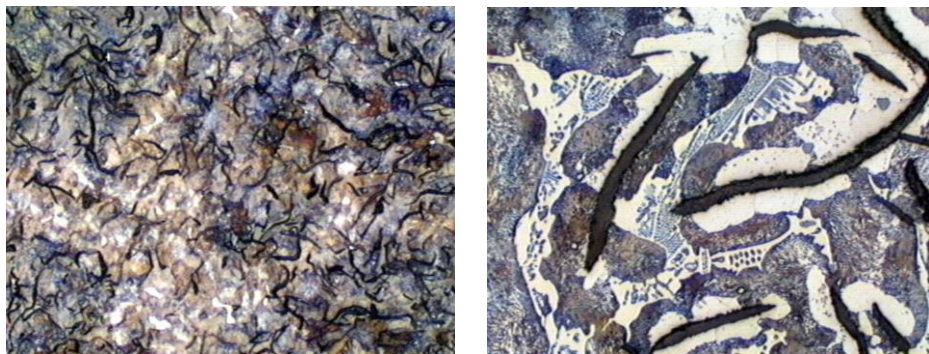


Ilustración 7. Fundición laminar

3.1.2. FUNDICIÓN NODULAR

También llamada fundición dúctil, es la que emplearé para llevar a cabo este trabajo. Esta se caracteriza porque el grafito en su interior se encuentra en forma de nódulos o esferoidal. Dicha forma se consigue durante la solidificación; donde a la mezcla en estado líquido se le han inoculado previamente elementos nodulizantes, estos elementos en concreto son el magnesio y el cerio. Este tipo de fundiciones son fáciles de maquinar, tienen buena fluidez para el colado y una alta resistencia mecánica. Además, tiene propiedades muy análogas a los aceros en términos de resistencia a tracción y compresión, alta resiliencia, límite elástico, tenacidad y ductilidad.

Las aplicaciones que se le puede dar a este tipo de fundiciones son en piezas del sector del automóvil, en tuberías, rejillas de imbornales, tapas de alcantarillado, apoyo de ejes en maquinaria, piezas industriales que van a estar sometidas a fatiga, entre otros.

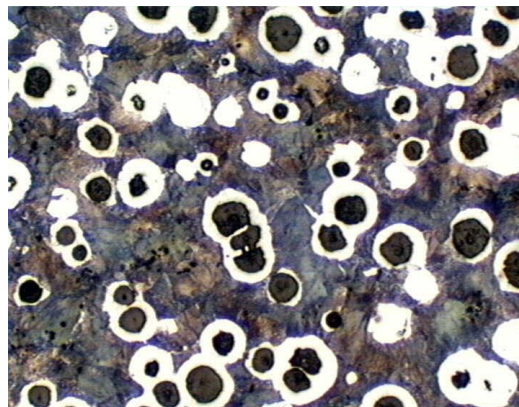


Ilustración 8. Fundición nodular

Así pues, como ya he comentado anteriormente y tras haber hecho las explicaciones pertinentes, la chapa que emplearé será la de fundición nodular por las propiedades que posee para hacer los ensayos a tracción y a dureza.

3.2. VARILLAS DE APORTE

Como las chapas a soldar son de acero inoxidable, el electrodo que se ha de emplear tiene que ser compatible con estas. De este modo, las varillas que emplearé serán ER de AISI 316L, las cuales tienen una alta resistencia a la corrosión y a la oxidación por su bajo contenido en carbono.

Estas varillas me proporcionarán una apariencia de cordón muy suave y prácticamente sin proyecciones, por lo que se puede alcanzar una soldadura muy limpia con ellas. Además pueden ser soldadas a amperajes bajos disminuyendo así el riesgo a que la pieza se deforme.

Otro punto a favor es que son fáciles de soldar ya que pueden colocarse en cualquier posición.

Las dimensiones de estas será $1,6\varnothing \times 1000$ mm y su composición la siguiente:

C	Si	Mn	Cr	P	S	Ni	Mo
<0,025	0,4	1,5	19	0,030	0,015	12,00	3,0

Tabla 1. Composición química 316L (% en peso)



Ilustración 9. Varilla de aporte 316L

4. TRATAMIENTOS TÉRMICOS

El tratamiento térmico es una operación que se basa en el calentamiento y enfriamiento de un material para modificar su microestructura, dichos cambios de temperatura provocarán variaciones en sus propiedades mecánicas. Para alcanzar las características deseadas hay que tener en cuenta factores como los grados de intensidad, la velocidad y los medios empleados.

Normalmente, buscamos dichos cambios estructurales para conferirle al material unas propiedades específicas y adecuadas para el uso que le vamos a dar. Los tratamientos térmicos más comunes son los siguientes:

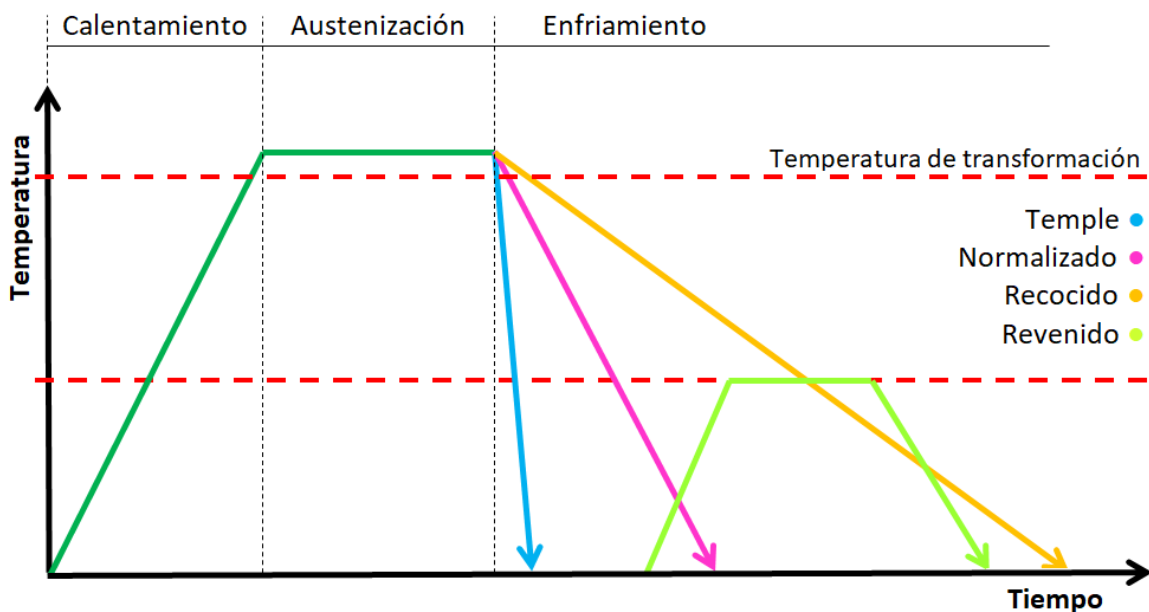


Ilustración 10. Tratamientos térmicos en función de la temperatura y el tiempo

Como podemos observar, tres de los tratamientos más habituales empiezan su proceso con el calentamiento necesario como para que su microestructura se reorganice dando pie a la formación de austenita, término ya tratado en el apartado 2. *Introducción*. El enfriamiento se lleva cabo habitualmente con agua con y sin sales disueltas, aceites, gases o aire.

Además, salvo en el temple; que aclararé en el siguiente apartado, las velocidades de enfriamiento del material siguen el diagrama de equilibrio de la *Ilustración 1* y, partiendo de la composición de carbono, podemos obtener la transformación de la austenita en perlita, cementita o ferrita. Así pues, cada una de ellas le conferirá al cuerpo las correspondientes propiedades ya explicadas en el apartado 2. *Introducción*.

4.1. TEMPLE

Como podemos observar en la gráfica, el temple consiste en calentar el material a una temperatura aproximadamente 40°C superior a la de transformación. Mantendremos este calor el tiempo que se requiera hasta que sea uniforme en todo el cuerpo, provocando así la formación total de austenita.

Tras lograr el calentamiento completo, el siguiente paso es el rápido enfriamiento con agua o aceite. Este descenso repentino de temperatura dificultará la difusión del carbono y causará que la precipitación de la austenita de lugar a un nuevo constituyente denominada martensita.

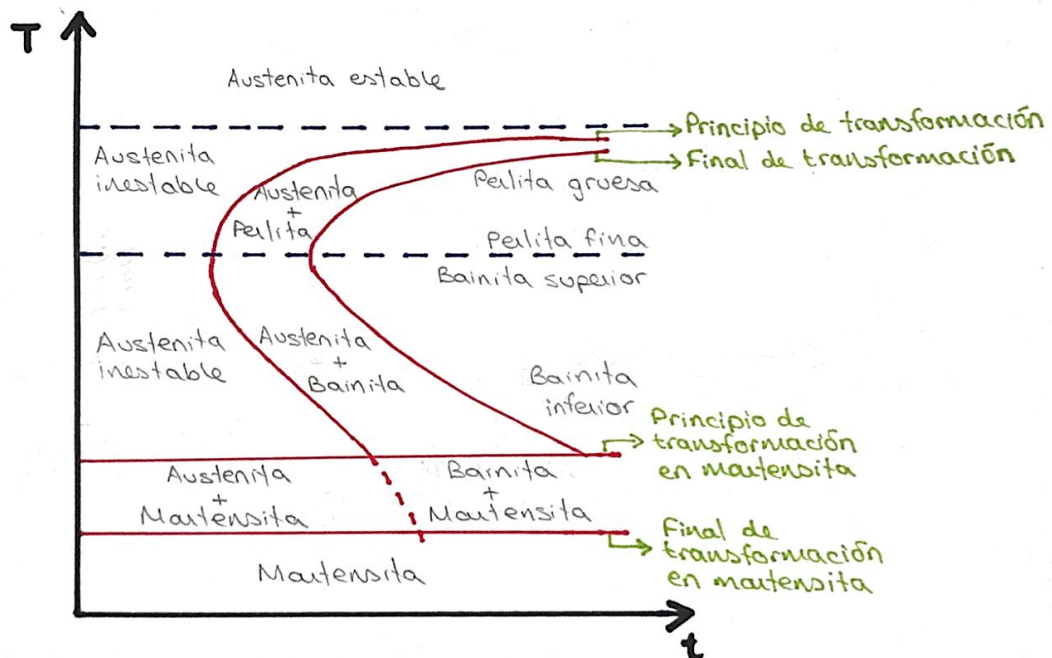


Ilustración 11. Diagrama curvas TTT (Temperatura, Tiempo, Transformación)

La martensita no se encuentra en el diagrama de fases (*Ilustración 1*) porque no es una fase de equilibrio; la cual se alcanza con velocidades de enfriamiento lentas. Las propiedades de este constituyente varían en función de su composición y especialmente a su porcentaje de carbono; si este aumenta, también lo harán la resistencia mecánica, la dureza, el límite elástico, tensión de rotura y la fragilidad del material, lo que también implica una disminución de la ductilidad, la tenacidad y la deformación de estricción.

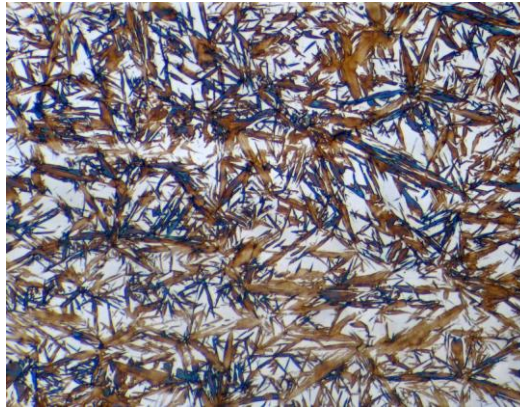


Ilustración 12. Micrografía martensita

4.2. NORMALIZADO

El normalizado es un tratamiento en el que se requiere calentar el material aproximadamente 50°C por encima de la temperatura de transformación, manteniéndola durante un periodo de tiempo concreto para lograr la homogeneidad de la estructura austenítica en toda la pieza.

Una vez realizado el calentamiento, se deja enfriar el cuerpo al aire a temperatura ambiente. De este modo se logra afinar la estructura y devolver a la pieza las características que se consideran el estado natural del material, es decir, se logra eliminar los efectos provocados por cualquier proceso de calentamiento que se le haya realizado previamente.

Por consiguiente, este tipo de proceso es adecuado tanto para eliminar las tensiones que aparezcan en el forjado, la laminación o tratamientos defectuosos, como para preparar el material para el temple y que su microestructura se homogeneice.

4.3. RECOCIDO

De nuevo precisamos de calentar la pieza inicialmente a una temperatura superior a la de transformación; similar a la del normalizado y el temple, manteniéndola durante el tiempo necesario para obtener la uniformidad estructural austenítica de la pieza.

Tras haber logrado la austenización total de la pieza, el enfriamiento lo realizaremos muy lentamente, normalmente, apagando el horno y dejando la pieza en su interior. Por lo que, obtendremos el ablandamiento deseado para mejorar las propiedades del material.



En consecuencia y dependiendo de la manera que se lleve a cabo este descenso de temperatura, podremos emplear este método tanto para la eliminación de tensiones internas producidas por tratamientos anteriores, como para incrementar la plasticidad, la ductilidad y la tenacidad del cuerpo.

4.4. REVENIDO

Generalmente y como ya he comentado anteriormente, tras hacer un tratamiento de temple, el material se queda demasiado frágil. Por lo que, lo más habitual es enmendar este efecto sometiendo a la pieza a un proceso de revenido lo antes posible.

En este caso, el calentamiento se hará a una temperatura y una velocidad de enfriamiento inferiores a la de temple, logrando eliminar las tensiones internas que puedan haber dentro del cuerpo.

Así pues, el resultado final será una disminución de la dureza; de su resistencia mecánica y con ello, de su fragilidad dando pie de este modo a un aumento en su ductilidad; su energía de deformación o, lo que es lo mismo, de su tenacidad.

5. UNIÓN DE CHAPAS

5.1. SOLDADURA

La soldadura es el proceso en el cual dos piezas se unen sólidamente, normalmente dichas piezas suelen ser metales. Esta se puede llevar a cabo mediante la mezcla indirecta o directa; lo que quiere decir con o sin aporte de material respectivamente.

Además, podemos encontrar soldaduras heterogéneas y homogéneas. Las heterogéneas son aquellas en que los materiales que se han unido con o sin metal de aportación tienen diferente naturaleza, o cuando son iguales pero el metal de aportación es distinto. En cambio, en las homogéneas, los metales soldados con o sin aportación, tienen la misma naturaleza o muy similar.

A parte de las distinciones ya hechas en los párrafos anteriores, existen diferentes formas de clasificación para la soldadura. De entre todas ellas, podemos encontrar la siguiente:

Según el mecanismo de soldadura	Por fusión	Eléctrica	Por arco
			Por resistencia
			Por chispa
			Por electroescoria
		Química	Por gas
	Radiante	Por láser	
	En estado sólido	Mecánica	Por forja
			Fría
			Por fricción
			Por ultrasonidos
	Blanda	-	-
Fuerte	-	-	

Tabla 2. Tipos de soldadura

5.1.1. SOLDADURA FUERTE

Es indirecta y, en esta, el punto de fusión del material de aporte debe superar los 450°C y ser inferior a la temperatura de fusión de los metales que se unen para que no llegue a producirse en ningún momento la fusión de alguno de estos; es por eso que puede ser homogénea y heterogénea. Asimismo, puesto que se realiza a temperaturas relativamente bajas, el metal base no suele verse afectado por los efectos que pueda causar el calor; como lo son las deformaciones o las tensiones residuales, entre otros.



Este tipo de soldadura se caracteriza por su alta ductilidad, su fortaleza y su buen acabado. Además, es posible conseguir mejores propiedades en la unión que en el metal base.

En cambio, la soldadura se puede ver afectada con las altas temperaturas, tampoco es una unión que pueda soportar altos esfuerzos mecánicos y no es resistente a la corrosión.

Las principales aplicaciones que tiene esta son en el sector de la metalurgia en la industria.

5.1.2. SOLDADURA BLANDA

También es indirecta y, en este caso, el punto de fusión del material de aporte tiene que ser inferior a los 450°C e inferior a la temperatura de fusión de los metales base para que no llegue a producirse la fusión de alguno de estos, de ahí que puedan ser homogéneas y heterogéneas. Asimismo, como las temperaturas alcanzadas en este tipo de soldadura son muy bajas en comparación a otros métodos de soldeo, el calor no suele provocar defectos en el metal base; al igual que sucede en la soldadura fuerte.

Las ventajas que tiene esta soldadura es que en caso de que la soldadura quiera ser desmontada, es sencillo de hacer. A parte, se requiere menos energía y es más económica que la soldadura fuerte.

Sin embargo, no es capaz de soportar esfuerzos mecánicos ni temperaturas moderadas y tampoco es resistente a la corrosión; aunque la tolera mejor que la soldadura fuerte. Además, su proceso es más complejo que la soldadura fuerte.

Los principales usos que se le dan a esta soldadura son los sectores eléctrico y electrónico.

5.1.3. SOLDADURA EN ESTADO SÓLIDO

Suele ser directa y en este caso, ninguna de las partes alcanza la fase líquida. El proceso al cual está sometido este tipo de soldadura es la aplicación de presión, que puede ser combinada con calor, con vibración o con ambas para hacer que los átomos se intercambien entre ellos generando así el enlace que provocará la unión. En el caso de aplicar calor localmente, ha de ser siempre inferior a la temperatura de fusión de los

metales que se van a soldar, por lo que el metal base no sufre ningún tipo de contrariedad debida al calor.

Los cinco tipos de soldaduras en estado sólido mencionados en la tabla adjuntada anteriormente se diferencian en cómo combinan los tres factores comentados para llevar a cabo este tipo de unión, pero el principio físico de enlace es común para todos ellos.

Se trata de una unión muy fuerte, ya que ambas piezas cristalizan en una misma estructura. Asimismo, puede ser homogénea y heterogénea, conservando cada una de las partes sus propiedades originales.

La desventaja que presenta este tipo de soldadura es que es muy complicado realizarla en piezas que no tengan la superficie de unión plana y se requiere que tengan un tamaño mínimo.

Los sectores en los que se aplica son diferentes y muy amplios dependiendo del tipo de soldadura en estado sólido empleado.

5.1.4. SOLDADURA POR FUSIÓN

Puede ser directa e indirecta y todas las partes alcanzan la fase líquida; tanto el material base, como el material de aporte si lo hay. Para lograr este estado, se requiere que la temperatura aplicada localmente a los materiales sea superior a la de fusión. El intercambio atómico se producirá entre los metales fundidos, de tal forma que las piezas queden completamente unidas al solidificar.

A continuación explicaré algunos de los diferentes tipos de soldadura por fusión mencionados previamente en la tabla adjunta ya que la usada en este trabajo pertenece a este tipo.

- SOLDADURA POR LÁSER

La cual suele ser directa y puede ser homogénea y heterogénea. Se realiza proyectando un haz concentrado de láser que aporta la energía necesaria para fundir y recristalizar la zona a unir junto con un gas protector; que suele ser helio o argón, también ha de aplicarse cierta presión entre las caras para llevarla a cabo correctamente. Esta unión es muy precisa, tiene una mayor profundidad de penetración, no genera ni poros ni proyecciones en el cordón de soldadura y es muy limpia. Además, los defectos que el calor puede causar son mínimos.

Otras de las ventajas es que proporciona unas propiedades mecánicas y velocidades de soldadura altas.

Como inconvenientes podemos encontrar que tiene un coste elevado y que se requiere de una gran precisión por la pequeña área a la que afecta el haz.

Este tipo de unión se suele emplear para las producciones en masa y que requieren buenos acabados; como lo son las industrias automovilísticas, alimentarias, médicas, aeronáuticas, del ferrocarril, entre otras. Asimismo, también se aplica en la reparación de piezas con un espesor pequeño.

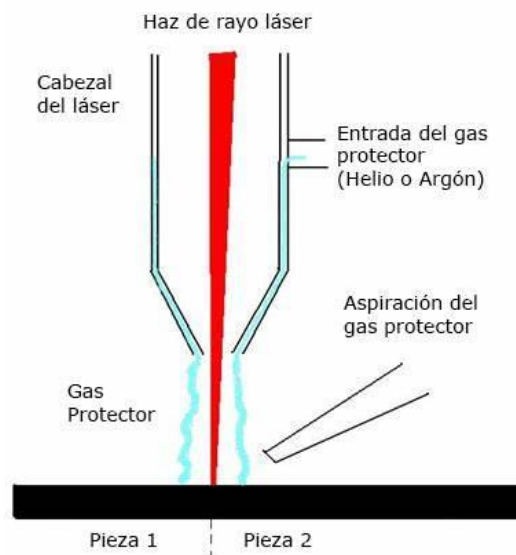


Ilustración 13. Soldadura por rayo láser

○ SOLDADURA POR GAS

Este tipo de soldadura puede ser directa e indirecta además de homogénea y heterogénea. Esta se basa en la combustión de dos gases; comburente más combustible, dicha combustión será la causante de la aportación térmica requerida para que el metal base y el aportado en caso de que lo haya, lleguen a fundirse provocando la unión de las piezas al solidificar. El comburente será oxígeno y el combustible puede ser uno u otro en función al tipo de soldadura que se desee, pero entre ellos los más comunes son el acetileno, el metano y el propano. Esta soldadura es sencilla de realizar y su equipo es cómodo de transportar. Además, trata de una soldadura que no requiere de electricidad para su ejecución.

Las propiedades de este tipo de soldadura dependen del tipo de combustible empleado y del tipo de llama.

Como desventajas podemos encontrar el requerimiento de los gases y la lenta velocidad de enfriamiento.

Este tipo de soldadura se utiliza sobre todo para la unión de tubos y tuberías y menos frecuentemente en las industrias. Asimismo también se emplea para calentar piezas y realizar tratamientos térmicos, ambos dos previos a otra modalidad de soldeo.

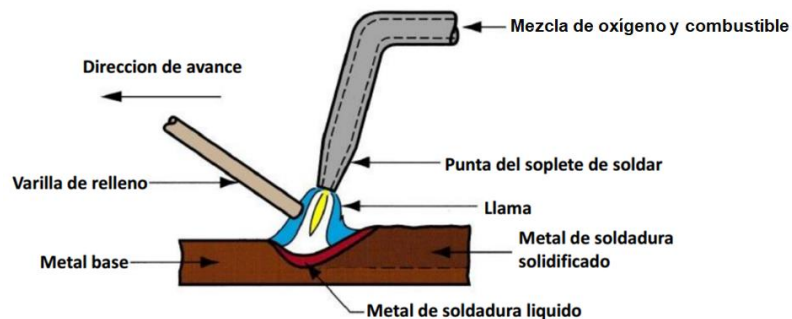


Ilustración 14. Soldadura por gas

○ SOLDADURA POR RESISTENCIA

Es directa y puede ser homogénea y heterogénea. Se realiza aplicando una corriente eléctrica elevada en los extremos de las dos piezas que se desean soldar y que están colocadas a presión. Así pues, será en la zona de contacto entre las piezas donde la resistencia al paso de la corriente sea máxima y provoque un aumento de temperatura tal, que llegue a la de fusión y se lleve a cabo la unión. Se trata de un proceso muy limpio y rápido.

Además, la principal ventaja de esta unión es la resistencia que se obtiene en la soldadura.

En cambio, podemos encontrar los inconvenientes de la limitación en la posición de soldeo de las chapas y de la imposibilidad de variar las propiedades del metal base por el uso de material de aportación.

Este procedimiento se emplea a menudo en la industria y sobre todo en producción de alambres y láminas de metal.

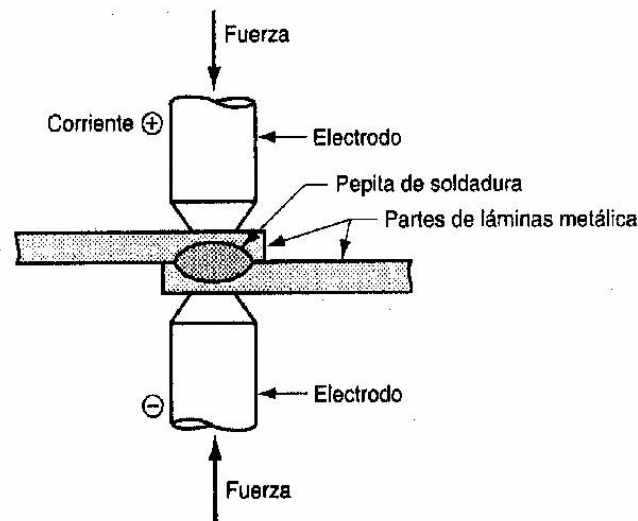


Ilustración 15. Soldadura por resistencia

○ SOLDADURA POR ARCO

Este método puede ser directo o indirecto y homogéneo o heterogéneo. La energía térmica encargada de fundir los materiales para conseguir su unión tiene origen en un arco eléctrico generado entre dos partes metálicas, las cuales suelen ser el electrodo y las piezas a soldar. El procedimiento para conseguir dicho arco es someter las dos partes conductoras en contacto a una diferencia de potencial; lo que significa que entre ellas habrá una corriente eléctrica. Posteriormente se provoca la ionización del aire o gas adyacente con una chispa generada al separar a una distancia mínima las partes, de tal modo que la corriente sigue circulando entre ambas pese a que no estén en contacto. Este tipo de soldadura es de las más empleadas en la actualidad, es muy económica, eficiente, rápida y segura.

Otras ventajas de este tipo de soldadura son su robustez, su ductilidad, su resiliencia y su resistencia a la corrosión.

Como desventajas se pueden considerar la habilidad que ha de tener el soldador al llevarla a cabo, el requerimiento de eliminar la escoria antes y después de realizar la operación, la necesidad de puntear previamente o precalentar para evitar las distorsiones térmicas, la limitación de los materiales y las posiciones al unir.

Las principales aplicaciones que tiene en la industria son muy amplias en función al método empleado.

Podemos encontrar diferentes modalidades, algunas de ellas son:

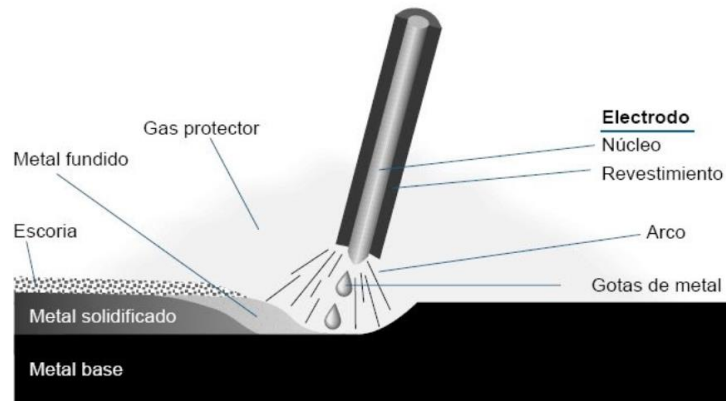


Ilustración 16. Soldadura SMAW (electrodo consumible)

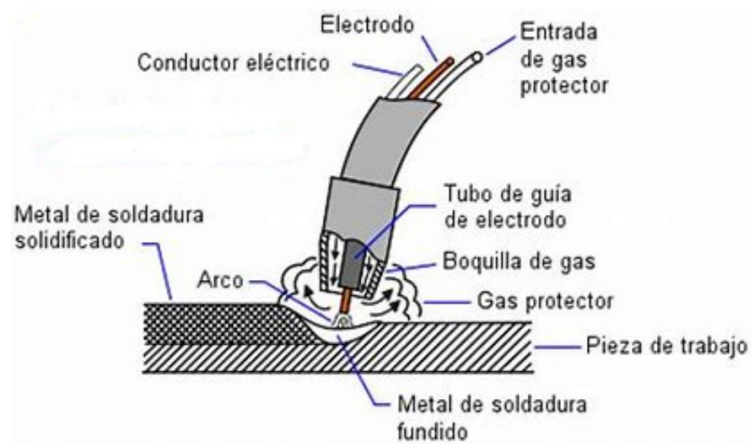


Ilustración 17. Soldadura GMAW (electrodo consumible)

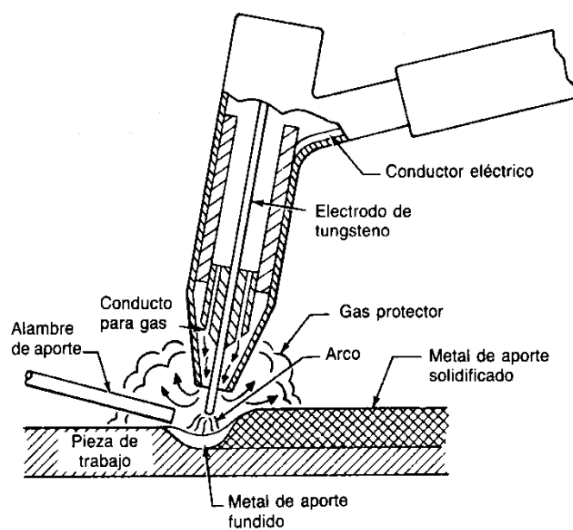


Ilustración 18. Soldadura TIG

5.2. MÉTODO Y EQUIPO EMPLEADO

Como ya se ha mencionado anteriormente, el tipo de soldadura que emplearemos será el tipo TIG (Tungsten Inert Gas); o también conocido como GTAW (Gas Tungsten Arc Welding). El mecanismo de unión de esta se realiza mediante la fusión con arco eléctrico y podemos ver el croquis del proceso de soldadura en la *Ilustración 16*. El electrodo no consumible que se emplea suele ser de tungsteno, pero en ocasiones también se puede dar el caso de que esté aleado con otros elementos como el torio y el circonio en pequeños porcentajes. En cuanto a los gases encargados de proteger dicho electrodo y el arco que se genera, los más comunes son el argón y el helio o una mezcla entre estos. En este tipo de unión puede o no haber material de aporte y como ya he aclarado anteriormente, en este proyecto sí que haré uso de una varilla de aporte 316L.

A parte de las comentadas en la soldadura por arco en general, en este tipo de unión encontramos como ventajas que no tiene proyecciones; por lo que el aspecto final es muy suave, asimismo es muy económica porque el electrodo es permanente.

Como inconvenientes; además de los mencionados de forma general en la soldadura por arco, tenemos que el gas ha de proporcionarse de forma uniforme porque si no, el arco oscila y puede dar pie al contacto entre el electrodo y la pieza provocando la contaminación del electrodo. Para solventar este problema, has de desmontar la antorcha y limar cónicamente la punta del electrodo. Por lo que al cabo del tiempo sí que has de cambiar dicho electrodo que en un principio debería ser permanente.



Ilustración 19. Antorcha TIG desmontada

En cuanto al equipo que emplearé será un soldador TRANSTIG 1700 en el cual se podrá acoplar la manguera con su respectiva antorcha. Por dicha manguera circulará tanto el gas como la corriente requerida para la unión.



Ilustración 20. Equipo soldador TRANSTIG 1700

5.3. PROCEDIMIENTO DE SOLDEO

5.3.1. MATERIAL DE PROTECCIÓN

En primer lugar, hemos de cerciorarnos de nuestra seguridad. Por lo que como vestimenta portaremos una bata, unas botas de seguridad, unos guantes aislantes del calor y una careta que nos proteja la cara y la visión.

5.3.2. CORTE CHAPA INICIAL

Partiré de una chapa inoxidable nodular inicial de 100 x 300 x 5 mm, la cual cortaré en 6 fragmentos de aproximadamente 100 x 45 ó 50 x 5 mm con un ángulo de chaflán de 30° (ver Ilustración 10); este nos facilitará posteriormente la soldadura gracias a su colocación en V.

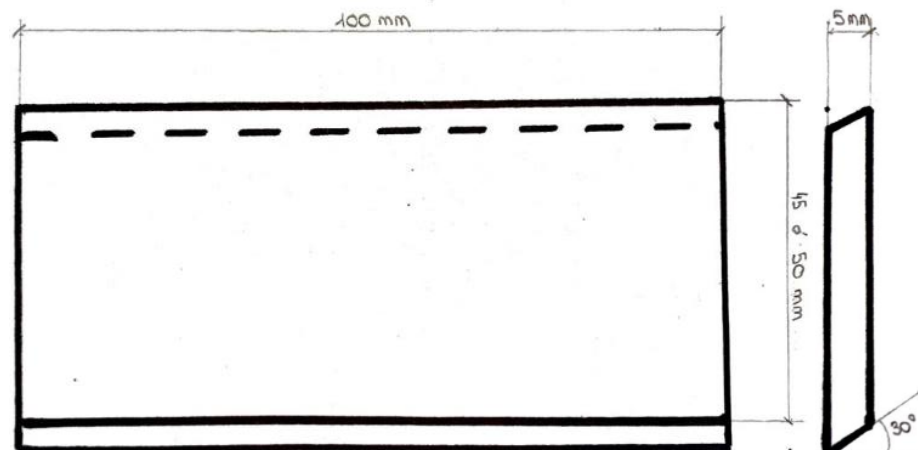


Ilustración 21. Dimensiones chapa a soldar

Para realizar dicho corte la máquina de la que haré uso será una sierra de cinta con accionamiento manual para metales, la cual nos da la posibilidad de realizarlo directamente con el ángulo de chaflán que precisamos.



Ilustración 22. Sierra de cinta con accionamiento manual

Así pues, las piezas cortadas las soldaré a pares; quedando finalmente las 6 probetas correspondientes sobre las que trabajar

5.3.3. PREPARACIÓN DE LAS PIEZAS

Tras haber cortado en seis fragmentos la chapa inicial como ya he explicado anteriormente, lijaremos la zona donde el ángulo del chaflán es menor de tal forma que podamos obtener el talón de la raíz para que haya mayor comodidad a la hora de colocar las piezas al soldarlas. Tras haber realizado este ajuste del corte, hemos de limpiar las piezas adecuadamente con un disolvente con el fin de eliminar cualquier impureza existente que pueda dar pie a futuras imperfecciones.

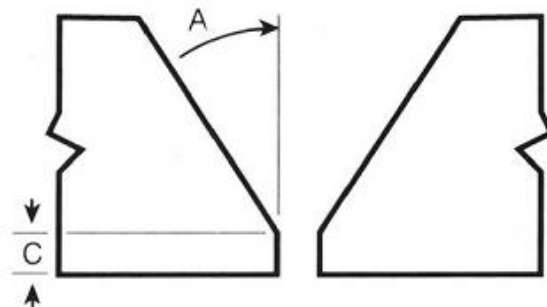


Ilustración 23. Ángulo de chaflán (A) y talón de raíz (C)

5.3.4. REGULACIÓN DEL EQUIPO

Como ya he comentado anteriormente, el equipo que emplearemos será de tipo TIG y en este hemos de regular algunos parámetros. El más relevante para llevar a cabo correctamente la soldadura es la intensidad. En este caso, le pondré a la corriente un valor de 125A para que tenga la suficiente intensidad como para que el arco llegue a cebarse, pero evitando valores demasiado elevados para prevenir que la zona que llega a fundir del material base sea excesiva causando imperfecciones en la unión.

5.3.5. AMARRADO Y PUNTEADO

Con el objetivo de conseguir una buena soldadura, es imprescindible que durante el proceso de unión las piezas no se muevan. Para ello, en primer lugar, amarraremos las piezas al banco de trabajo con los sargentos que se requiera manteniendo entre ellas una distancia no superior a los 3 mm y teniendo en cuenta que la soldadura será en V. Posteriormente, puntuaremos a lo largo de la zona soldar para evitar futuras deformaciones; entre otros defectos. Además es importante seguir el orden indicado en la *Ilustración 25*.

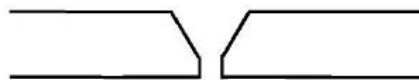


Ilustración 24. Colocación de las chapas a soldar en V

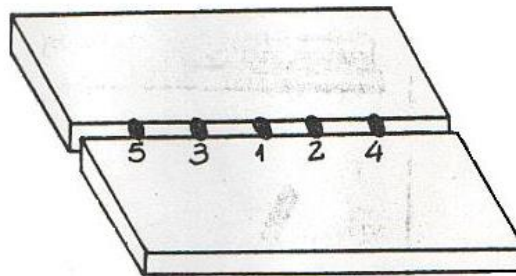


Ilustración 25. Orden del punteado

5.3.6. CORDÓN DE SOLDADURA

El cual lo realizaremos con una posición angular de la antorcha de aproximadamente 60°. Cabe decir que este es uno de los pasos más

importantes además de ser el más complejo. Para realizarlo correctamente se han de tener las precauciones necesarias para que el cordón de soldadura quede lo más homogéneo posible haciendo la aportación de material de manera uniforme evitando cometer cualquier fallo que dé pie a imperfecciones, pues estas puedan afectar a la eficacia de la unión. En nuestro caso fueron necesarias entre 2 y 3 pasadas por cada una de las probetas hasta rellenar completamente el cordón.



Ilustración 26. Cordón de soldadura

5.3.7. ACABADO

Por último, para poder dar por acabado el proceso de soldeo, el cordón ha de quedar lo más limpio posible.

Para ello primero tendremos que quitar la escoria. Este paso lo podemos realizar con un cepillo de alambres si se trata de poca escoria; o en caso de que haya una mayor cantidad emplearemos primero un martillo y después el cepillo.

Finalmente, devastaremos y puliremos el material de aporte sobrante con una amoladora para que la superficie se quede lisa. Emplearemos varios discos con el grano más o menos grueso en función de la cantidad de material que queremos quitar y el acabado que deseamos obtener.

5.4. DEFECTOS EN LA SOLDADURA

Es posible que durante el proceso de unión surjan algunos defectos en la soldadura; tanto estéticos como internos que, posteriormente pueden dar pie a resultados indeseados. Normalmente, los parámetros que afectan a la calidad de la unión son los valores excesivos o insuficientes de la intensidad, de la longitud de arco y de la velocidad de soldeo. En la siguiente imagen podemos observar:

- A: Soldadura adecuada
- B: Intensidad baja
- C: Intensidad alta
- D: Longitud de arco corta
- E: Longitud de arco larga
- F: Velocidad de desplazamiento lenta
- G: Velocidad de desplazamiento elevada

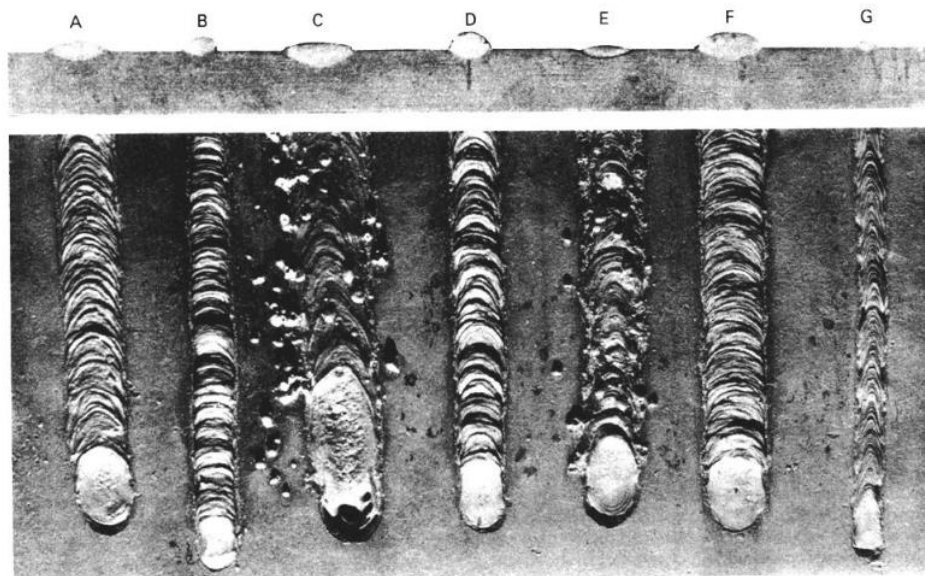


Ilustración 27. Defectos en la soldadura

Los defectos más habituales los enumeraremos a continuación. Nosotros explicaremos a qué valores de los parámetros comentados anteriormente puede deberse cada uno, pero hay que tener en cuenta que la obtención de una buena soldadura no depende únicamente de estos factores.

5.4.1. FUSIÓN INCOMPLETA

Este tipo de defecto se debe a la falta de penetración o de unión entre los cordones de soldadura y el metal base; o entre los cordones de soldadura. Este fallo se debe normalmente a la falta de intensidad, a la excesiva velocidad de desplazamiento o a una longitud de arco demasiado larga. Asimismo, también puede afectar la posición del electrodo, el ángulo del bisel, la escasa separación o desalineación entre chapas, la realización de un mal empalme, entre otras técnicas operatorias realizadas de manera deficiente o inadecuada por parte del soldador.

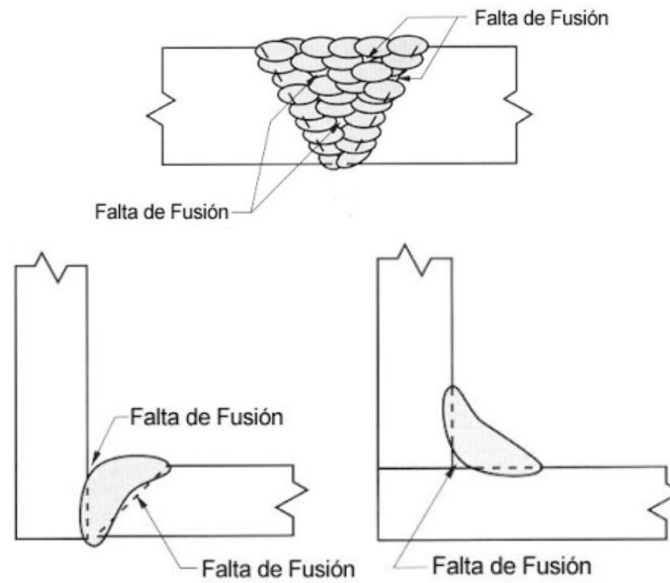


Ilustración 28. Fusión incompleta

5.4.2. MORDEDURAS

Las mordeduras o también llamado socavaciones son causadas por la falta de metal, esta tiene forma de canal en los bordes de la soldadura. Los motivos por los cuales se puede originar dicho fallo son principalmente el uso de una intensidad elevada o una velocidad de desplazamiento excesiva. Igualmente se puede dar por una mala colocación del electrodo.

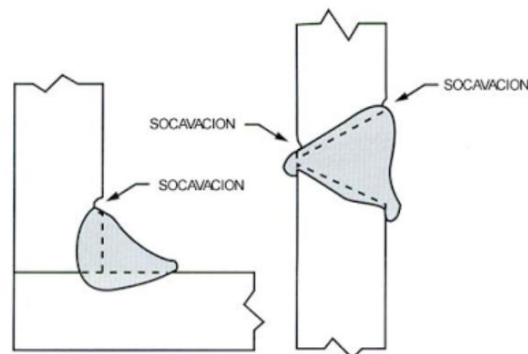


Ilustración 29. Mordedura

5.4.3. FALTA DE PENETRACIÓN

Este fallo se produce por la falta de aportación o inserción de material entre las chapas que queremos unir. Generalmente suele ser debido a una intensidad insuficiente o una velocidad de soldeo elevada. Del mismo modo

que en la *Fusión Incompleta*, la falta de penetración también puede ser debida a la falta de técnica operatoria del soldador.

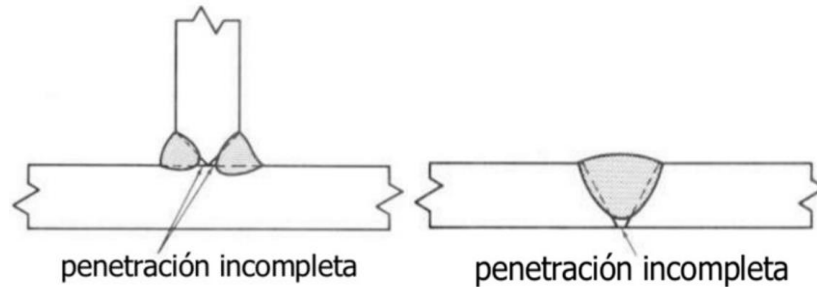


Ilustración 30. Falta de penetración

5.4.4. POROSIDAD O CAVIDAD

Este defecto es debido al atrapamiento de los gases en el cordón de soldadura en el enfriamiento parcial de la unión impidiendo así el escape de. Finalmente, cuando estos gases sean emitidos al exterior en la solidificación total de la soldadura se originaran dichos poros. Así pues, cuanto mayor sea la velocidad de enfriamiento, mayor será la cantidad de poros que podamos encontrar. Las causas más habituales son un exceso de intensidad, una alta velocidad de soldeo o una reducida longitud de arco. También puede deberse a la falta de limpieza, a que el gas de protección es insuficiente o inadecuado, condiciones de soldeo, entre otros.

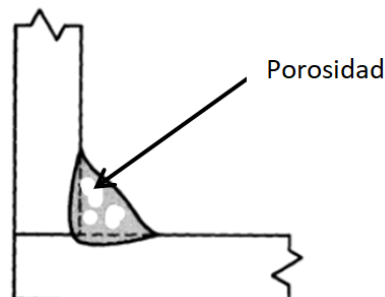


Ilustración 31. Porosidad

5.4.5. GRIETAS

También llamadas fisuras, se originan porque las tensiones locales generadas por los gradientes de temperatura superan la carga de rotura de los materiales involucrados en el proceso de unión. Pueden aparecer tanto en el metal de aporte como en el metal base. Normalmente son debidas a una intensidad alta. Además podemos encontrar otras causas como la

velocidad de enfriamiento, el insuficiente material de aportación o la mala soldabilidad del metal base, y demás.

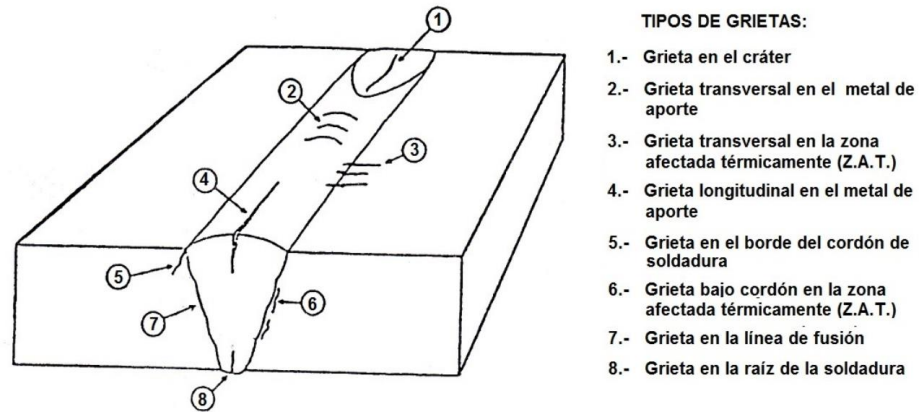


Ilustración 32. Grietas

5.4.6. INCLUSIONES SÓLIDAS

Esta discontinuidad se debe al atrapamiento de escoria o residuos, o de partículas u óxidos metálicos. La aparición ellos puede ser causada por emplear una intensidad insuficiente para el caso de la escoria, y muy elevada en el soldeo por TIG para las inclusiones de volframio o por mantener un arco demasiado largo. A parte también pueden afectar los factores debidos a la mala praxis del soldador, como la falta de limpieza, la inclinación del electrodo, la mala preparación de la unión, etcétera.

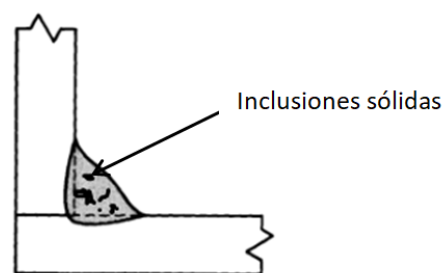


Ilustración 33. Inclusiones sólidas

5.5. RESULTADO FINAL

En la *Ilustración 34* podemos observar el resultado final de las piezas soldadas tras haber llevado a cabo todos los pasos requeridos y explicados previamente.

Estas corresponden respectivamente a la pieza precalentada, a la pieza que no ha sido sometida a ningún tratamiento térmico y a la pieza que se ha sometido a un tratamiento térmico de recocido.



Ilustración 34. Resultado final piezas soldadas

A continuación y en el mismo orden que la *Ilustración 34*, podemos observar las radiografías de dichas piezas para detectar los defectos presentes en el cordón de soldadura, los cuales nos pueden dar resultados erróneos en los ensayos que vamos a realizar.

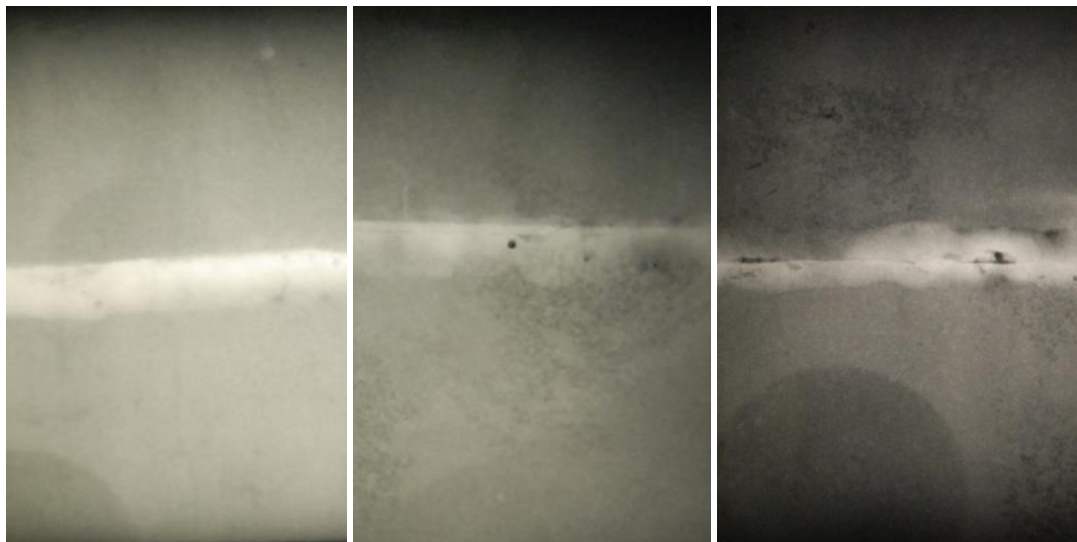


Ilustración 35. Radiografías piezas soldadas.

En la sometida a un precalentamiento de 450°C podemos ver que la soldadura se ha efectuado correctamente. La que no se le ha efectuado ningún tratamiento térmico podemos localizar un poro; para que no nos afecte en los resultados de los ensayos a realizar, la probeta extraída de esta pieza no la emplearemos para hacer ningún ensayo. Y finalmente, en la sometida a tratamiento térmico de recocido,



podemos detectar un poro y falta de penetración. Para evitar los efectos adversos referidos al poro, seguiremos el mismo procedimiento que hemos descrito anteriormente. Y, para la falta de penetración, recalculemos el área de la sección transversal en caso de que este dato sea necesario para el ensayo.

6. CORTE PROBETAS PARA ANÁLISIS Y ENSAYOS

Tras haber hecho el proceso de soldeo; ya aclarado en el apartado anterior, procederemos a cortar cada una de las 3 probetas obtenidas en 5 fragmentos cada una para poder realizar el análisis de las micrográficas y los ensayos de dureza, de tracción y de corrosión.

Para ello emplearemos una tronzadora para metal con refrigeración, ya que nos da la posibilidad de cortar las piezas de una manera muy limpia y con el tamaño requerido; emplea un disco especial de corte por abrasión. Además, no hay posibilidad a la alteración microestructural por sobrecalentamientos gracias al gran caudal de refrigeración que suministra.



Ilustración 36. Tronzadora para metal con refrigeración

Las dimensiones finales de las probetas sobre las que haremos los ensayos tendrán una dimensión aproximada de $(80 \pm 5) \times (13 \pm 3) \times (5 \pm 1)$ mm (largo x ancho x espesor). Pero la probeta que emplearemos para observar la micrografía y hacer el ensayo a dureza le acortaremos el largo para que quepa sin problema en la máquina de embutición.



Ilustración 37. Probetas cortadas para ensayos

7. ENSAYO DE MICROGRAFÍA

El ensayo micrográfico es una técnica que está catalogada dentro de la metalografía; una disciplina científica que se dedica al estudio estructural de un metal o una aleación mediante diversos métodos para poder relacionarlo con sus propiedades físicas, químicas y mecánicas.

Por consiguiente, la micrografía consiste en observar una zona del elemento mediante instrumentos ópticos con aumentos entre 50x y 2000x. Tal ampliación nos permite conocer su microestructura para analizar la forma y el tamaño del grano de los constituyentes que, van a afectar considerablemente a las propiedades de este.

Por lo cual, se podría decir que este tipo de ensayo complementa a todos los demás ya que, podremos justificar y entender cómo reacciona un material a los esfuerzos, a los tratamientos térmicos o a los ambientes a los que se le vaya a someter.

7.1. PROCEDIMIENTO PARA LA PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

Para llevar a cabo este ensayo, utilizaremos una de las probetas extraídas de cada uno de los tres trozos soldados. Acordándonos de que en este caso, emplearemos el que le hayamos acertado la longitud.

7.1.1. EMBUTICIÓN

Para la embutición de las probetas, haremos uso de un compuesto termoendurecible; TransOptic de la marca Buehler, el cual se compone de metacrilato casi en su totalidad.



Ilustración 38. Compuesto termoendurecible

La máquina encargada de aplicarle el calor y la presión que se requiere al metraquilato para conformar la pieza será una presa de montaje en caliente para micrografías, la Struers LaboPress-3.



Ilustración 39. Prensa de montaje en caliente Struers LaboPress-3

A continuación, explicaré cómo llevar a cabo el proceso de embutición de la probeta.

Primero, ha de situarse la probeta en la superficie interna móvil de la máquina; con la cara que vamos a micrografiar hacia abajo. Seguidamente, se añade el metacrilato hasta que cubra por completo la pieza. Antes de cerrar el orificio, limpiaremos el exterior del hueco para eliminar el posible polvo que hayamos vertido.

Una vez enroscado el tapón, accionaremos la máquina. A la cual le llevará 7 minutos calentar el compuesto termoendurecible hasta su fusión, y otros 7 minutos de enfriamiento a la vez que aplica una fuerza de 15kN para lograr la compactación total del bloque. Será el aparato en cuestión el que nos indique que el proceso ha concluido; habremos de esperar un tiempo adicional al enfriamiento total de la pieza.



Ilustración 40. Muestras embutida

7.1.2. PULIDO

La primera fase del pulido es el desbaste grueso, el cual se realiza para dejar la superficie nivelada y eliminar rebabas, crestas o cualquier tipo de irregularidad. Este se lleva a cabo con la máquina desbastadora, con un papel de lija de 220 granos/pulgada lineal situada en el disco metálico giratorio a velocidad constante.

Tras completar el primer paso, pasaremos al siguiente: desbaste fino. El cual tiene como finalidad preparar la superficie para el pulido. Para ello, hemos de tener en cuenta la colocación de la pieza a la hora de lijarla; nos cercioraremos de que en este caso, la dirección del lijado será con 90º de diferencia con respecto al grueso. El papel de lija será de 500 granos/pulgada lineal.

Y por último, una vez no detectemos más rayas de las que son provocadas por el propio desbaste fino, realizaremos el pulido. Dicho proceso consiste en dejar las piezas con el mejor acabado superficial posible para poder examinarlas en el microscopio. El componente imprescindible en esta última etapa será la pasta de diamante de 3µm, que la aplicaremos sobre el disco de pulido; papel de lija de 1000 granos/pulgada lineal, junto con un poco de aceite de pulido, el cual nos facilitará el movimiento circular que debemos realizar manualmente; contrario al del disco. Dicho movimiento se requiere para que el pulido se realice en todas las direcciones de la superficie, consiguiendo así mejores resultados.

Las tres operaciones comentadas se realizan en una máquina de esmerilado/pulido; la LaboPol-21 de Struers. Lo que cambia entre ellas es el tipo de grano de cada lija y las sustancias empleadas.



Ilustración 41. Máquina de pulido Struers LaboPol-21

7.1.3. ATAQUE

Una vez hemos dejado la superficie completamente limpia con el pulido, realizaremos el ataque para revelar claramente la microestructura del material.

Hay varios métodos de ataque, pero el químico es el más común y, el que emplearemos en nuestro caso. Consiste en sumergir levemente en un reactivo la cara que vamos a examinar en el microscopio durante unos pocos segundos, a ser posible haciendo un tenue movimiento para que el líquido esté continuamente renovándose, de tal forma que ataque a la superficie de la manera más uniforme posible. Esta técnica se fundamenta en la velocidad de disolución o de reacción de cada componente en el reactivo; a mayor velocidad, más atacado queda y más oscuro será el color que adquiera. Consiguientemente, a menor velocidad, más claro permanecerá el componente.



Ilustración 42. Muestra sumergida en el reactivo

El reactivo empleado será Nital-3; ácido nítrico y alcohol. Además hay que tener cuidado con el tiempo de exposición ya que, en caso de excederse podemos quemar o deteriorar la estructura y tendríamos que repetir el proceso de pulido.



Ilustración 43. Reactivo Nital-3

Posteriormente, lavaremos la muestra con agua y la enjuagaremos con alcohol. El secado lo realizaremos con un secador, de este modo evitaremos las ralladuras que puedan causar el uso de un papel o un paño.

7.2. OBSERVACIÓN MICROSCOPICA

Para alcanzar a distinguir claramente los diferentes constituyentes de la muestra, necesitaremos un microscopio con la potencia suficiente para que nos proporcione los aumentos requeridos. En este caso haremos uso del Microscopio Nikon Microphot-FX, con aumentos desde 50x hasta 400x. Además, cuenta con una ranura para conectar una cámara Nikon FX35 que nos facilitará la obtención de las micrográficas digitalmente.



Ilustración 44. Microscopio Nikon Microphot-FX

El proceso a seguir para enfocar correctamente a la zona deseada será el explicado a continuación. Inicialmente, pondremos una ampliación de 50x; la mínima. Colocaremos la muestra bajo la luz que emite el microscopio apuntando a la zona que queremos observar. Después, miraremos a través de las lentes para cerciorarnos de que efectivamente, la zona que se ve es la deseada y, que en este caso, es la superficie que va desde el cordón de soldadura hasta el metal base. Finalmente, iremos incrementando los aumentos del microscopio a la par que procuramos no perder la zona que queremos analizar, hasta llegar a un total de 400x; ampliación suficiente como para diferenciar los microconstituyentes que lo integran.

En este ensayo visualizaremos todos los tipos de microestructuras presentes en cada una de las tres probetas. Y dado que estamos estudiando tratamientos térmicos y soldaduras, tendremos la zona de fusión o cordón de soldadura, la interfase de soldadura, la zona afectada por el calor (ZAC) o zona próxima a interfase y el metal base no afectado por el proceso de soldeo, pero sí por los tratamientos térmicos.

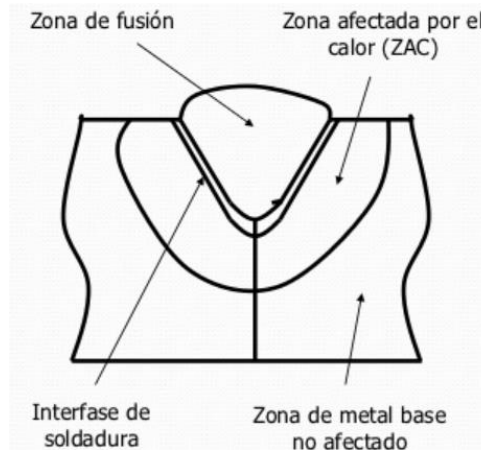


Ilustración 45. Partes de una soldadura

7.3. RESULTADOS

7.3.1. PROBETA CON PRECALENTAMIENTO A 450°C

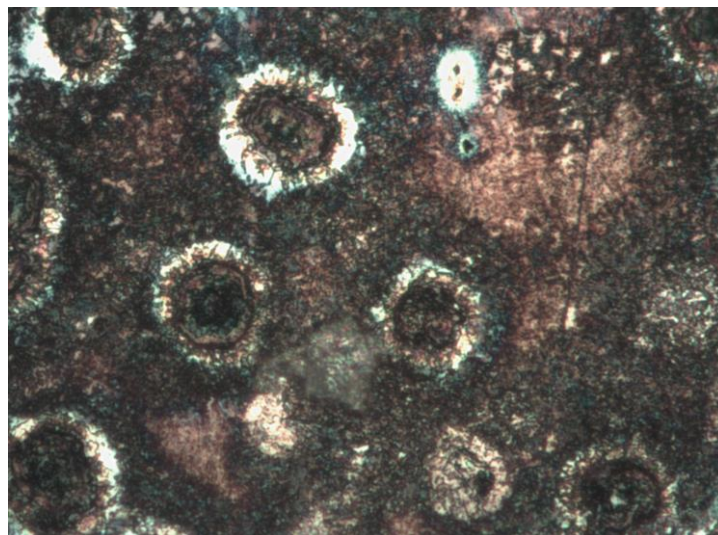


Ilustración 46. Micrografía 400x metal base con precalentamiento a 450°C

Zona con matriz perlítica no transformada donde se conserva la estructura original. El cerco que rodea los nódulos es ferrita.

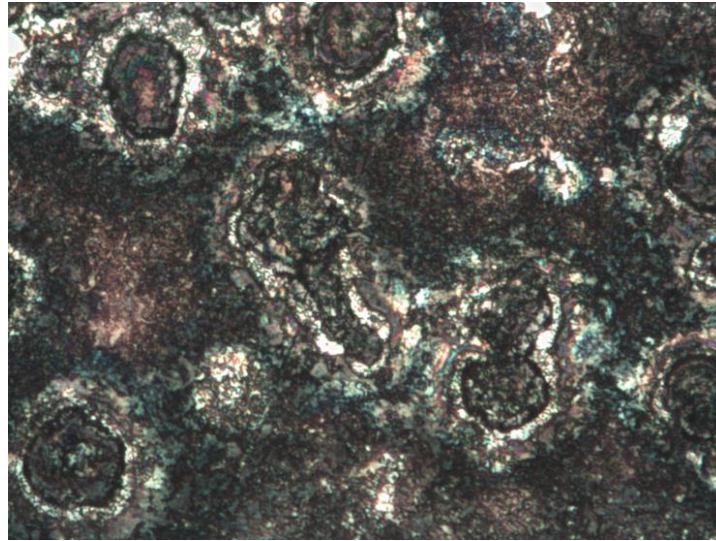


Ilustración 47. Micrografía 400x metal base próximo a la interfase con precalentamiento a 450°C

La microestructura es muy similar a la del metal base, con nódulos de grafito rodeados de ferrita y una matriz de perlita fina y parte de bainita que le concede al material una dureza superior a la original.

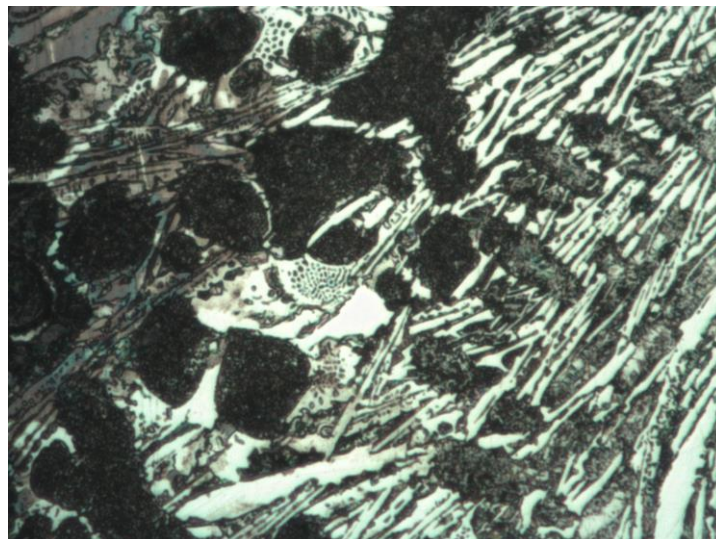


Ilustración 48. Micrografía 400x interfase con precalentamiento a 450°C

Se puede apreciar la fundición blanca, siendo las rayas más claras cementita acicular. Las zonas con puntitos más pequeños que encontramos en menor proporción son ledeburita sin transformar. Los fragmentos más oscuros son nódulos de grafito de menor tamaño y de forma más irregular que los propios nódulos de la fundición dúctil como consecuencia del cambio estructural en el enfriamiento a temperatura ambiente.

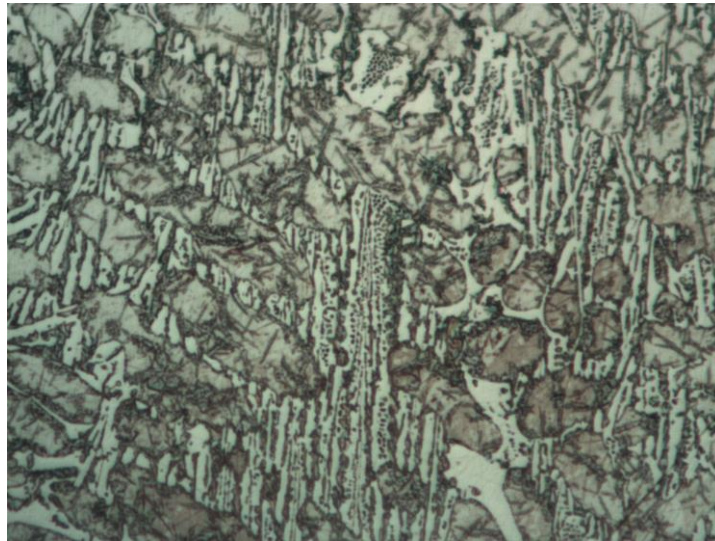


Ilustración 49. Micrografía 400x cordón de soldadura con precalentamiento a 450°C

Matriz austenítica con pequeñas trazas de ledeburita sin transformar en el cordón de la interfase.

7.3.2. PROBETA SIN TRATAMIENTO TÉRMICO

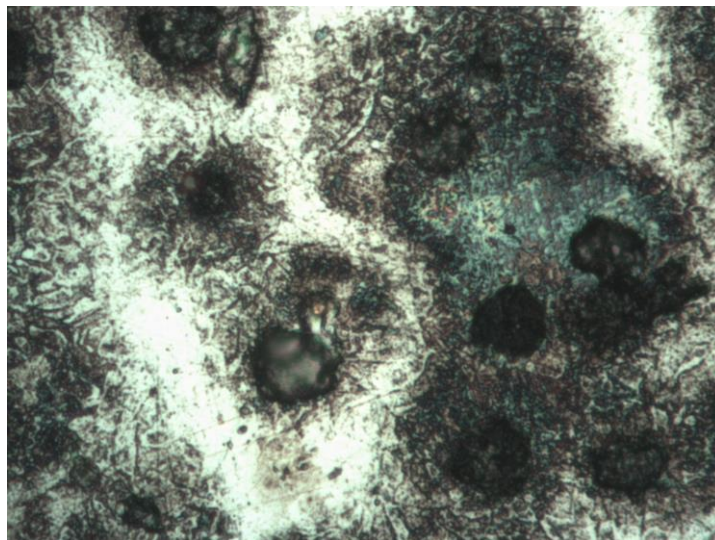


Ilustración 50. Micrografía 400x metal base sin tratamiento térmico

Podemos diferenciar los nódulos de grafito con forma esférica embebidos en una matriz perlítica. Podemos diferenciar que sin tratamiento térmico aparente, aparecen trazas de martensita en matriz de austenita.

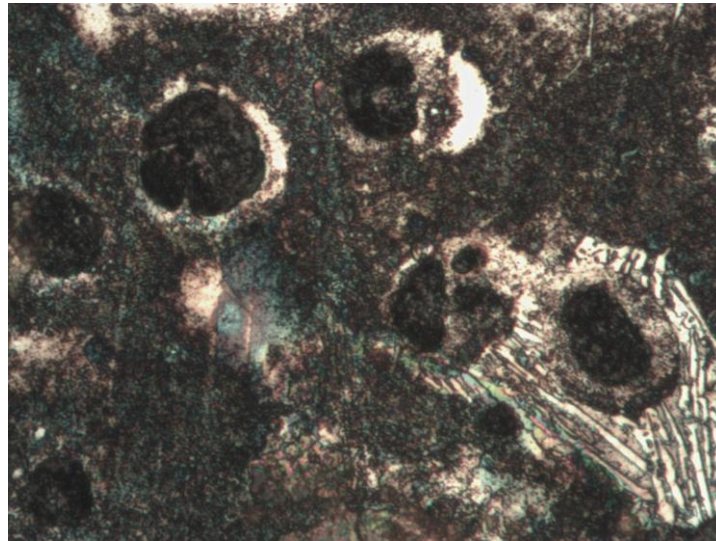


Ilustración 51. Micrografía 400x metal base próximo a la interfase sin tratamiento térmico

Se pueden distinguir nódulos de grafito rodeados de ferrita en una matriz de perlita fina y bainita. A la derecha ya se empieza a distinguir la zona de la interfase de fundición blanca y trazas de ledeburita sin transformar.

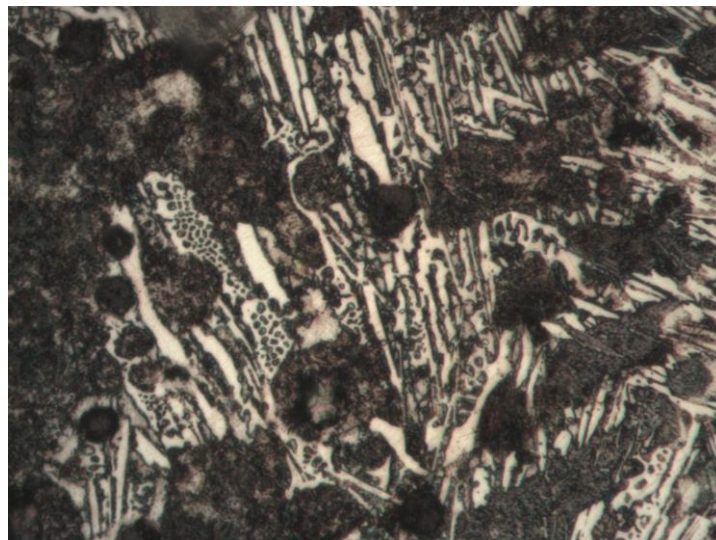


Ilustración 52. Micrografía 400x interfase sin tratamiento térmico

Nos encontramos con fundición blanca, las rayas más claras serán la cementita acicular. Se aprecia también la presencia de ledeburita sin transformar (zonas blancas con pequeñas esferulitas oscuras). Finalmente, hay presencia de martensita y bainita proveniente de la transformación de la perlita y de pequeños nódulos de grafito.

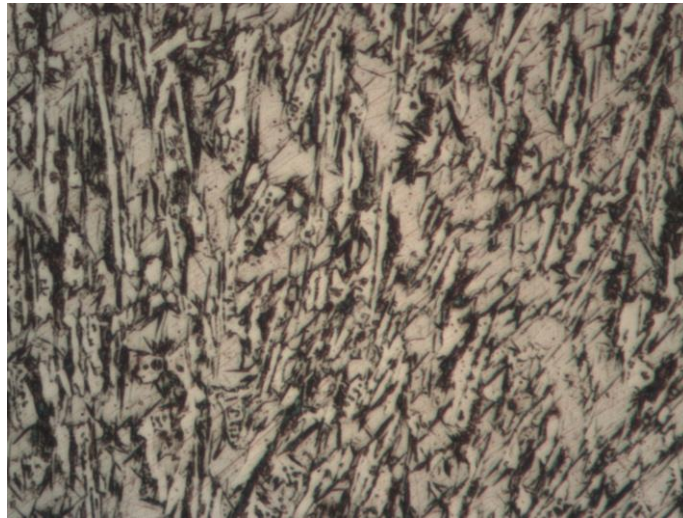


Ilustración 53. Micrografía 400x cordón de soldadura sin tratamiento térmico

Acero inoxidable con estructura completamente austenítica. Además se pueden distinguir carburos de cromo en los límites de los cristales de austenita. Esta micrografía corresponde también con la microestructura del electrodo 316L empleado para el proceso.

7.3.3. PROBETA CON TRATAMIENTO TÉRMICO RECOCIDO A 900°C Y ENFRIAMIENTO EN HORNO

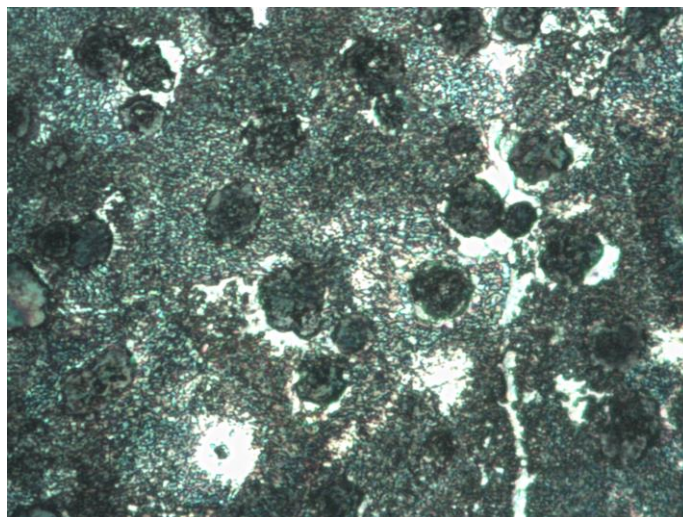


Ilustración 54. Micrografía 400x metal base con recocido a 900°C

En este caso, tendremos una matriz básicamente perlítica con algunas zonas de ferrita rodeando a los nódulos ya que, el enfriamiento de la pieza tras el recocido ha sido lento. La microestructura se completa con los nódulos de grafito de la fundición.

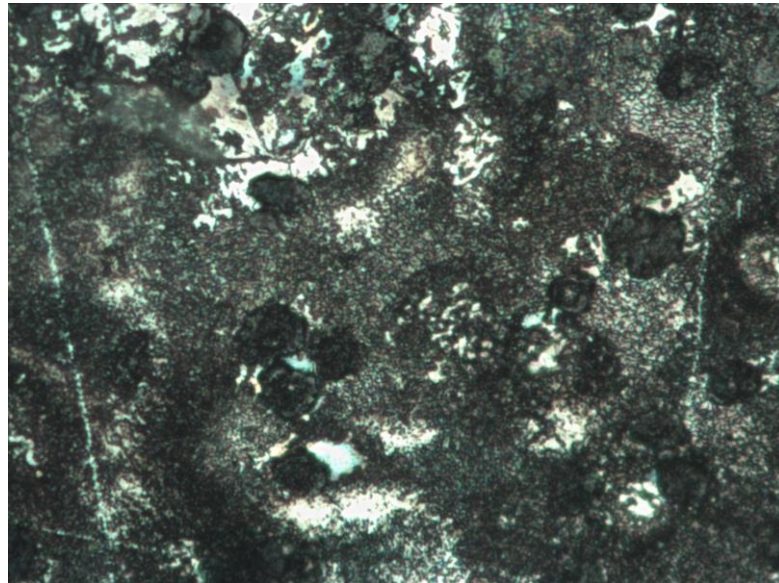


Ilustración 55. Micrografía 400x metal base próximo a la interfase con recocido a 900°C

La microestructura es idéntica a la anterior, con nódulos de grafito en una matriz predominantemente perlítica con zonas de ferrita.

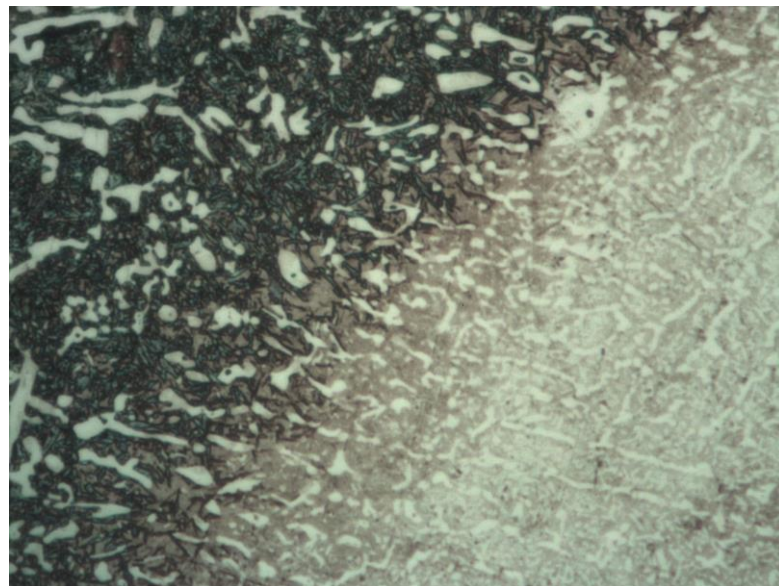


Ilustración 56. Micrografía 400x interfase con recocido a 900°C

En esta micrografía se aprecia el cambio repentino desde la estructura de la fundición a la del cordón, con una estructura básicamente perlítica en matriz ferrítica.

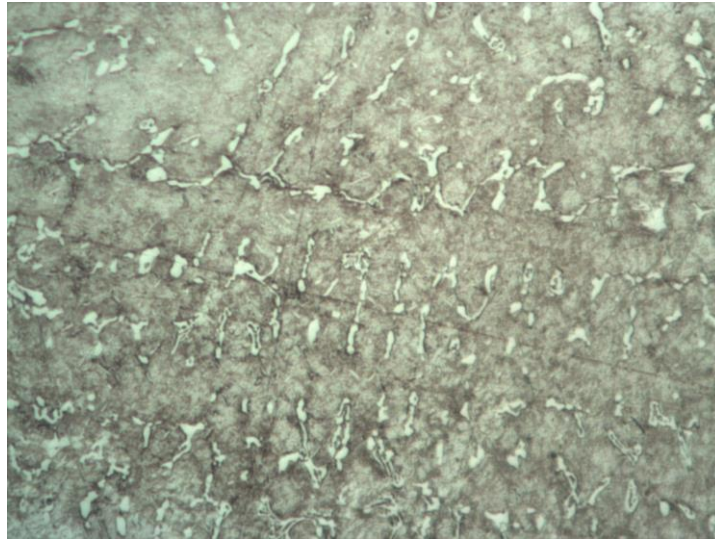


Ilustración 57. Micrografía 400x cordón de soldadura con recocido a 900°C

Estructura dendrítica de la austenita del cordón de soldadura con trazas de la ferrita del metal base debido a la fusión de estos dos en el recocido. También precipitados de carburos de cromo que no han llegado a la disolución con el tratamiento térmico aplicado.

8. ENSAYO DE DUREZA

La dureza nos permite determinar la resistencia que opone un material a ser rayado o penetrado por otro de manera permanente. Dicha propiedad depende de factores como la estructura cristalina del material y de sus propiedades elásticas. Así pues, podemos afirmar que guarda una correlación total con la microestructura estudiada en el apartado 7. *Ensayo de micrografía* y de la resistencia a tracción de un material; que estudiaremos en el siguiente apartado.

Para poder determinar cuán de duro es un material podemos hacer uso de diferentes ensayos. Los más comunes son el método Rockwell, el método Brinell y el método Vickers. Todos ellos se basan en el estudio de la huella dejada al hincar un material de dureza superior al ensayado sobre la superficie a analizar y, la diferencia entre estos es la manera de estudiar dicha marca.

8.1. MÉTODO Y EQUIPO EMPLEADO

En nuestro trabajo emplearemos el método de Vickers. Este es un ensayo no destructivo que, como ya hemos comentado anteriormente, evalúa la dureza a partir de la impresión que deja el penetrador al ser presionado sobre la superficie que estamos estudiando.

Dicho penetrador es un indentador de diamante con forma piramidal tetraédrica y con un ángulo entre aristas de 136° .

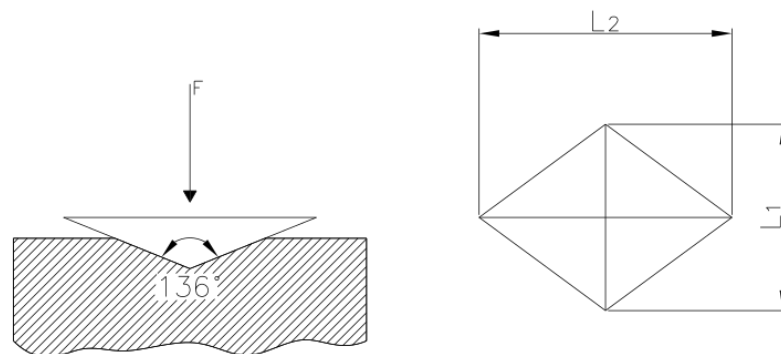


Ilustración 58. Indentador ensayo de dureza Vickers

El cálculo de la dureza a partir de las medidas de la huella se hace con la siguiente ecuación.

$$H_v = \frac{2F \operatorname{sen} \left(\frac{\alpha}{2} \right)}{L^2}$$

Ecuación 1. Dureza Vickers

Donde:

F : carga aplicada en kgf.

α : ángulo entre las aristas opuestas de la punta de diamante en $^{\circ}$.

d : longitud media de las dos diagonales del rombo de la huella en mm.

En nuestro caso, el resultado nos lo devolverá directamente el equipo al introducir las medidas L_1 y L_2 en el sistema de control digital.

La máquina empleada será un microdurómetro INNOVATEST 400A SERIES.



Ilustración 59. Microdurómetro INNOVATEST 400A SERIES

8.2. PROCEDIMIENTO

Las probetas que emplearemos serán las mismas que para los ensayos micrográficos. Lo primero que tenemos que hacer es localizar la zona que queremos ensayar con la lente de menor aumento; 50x. Posteriormente, cambiaremos a 200x para poder clavar la punta del diamante con la mayor exactitud posible en el punto deseado.

Tras la localización, pasaremos de la función de visión de la microestructura, hasta la de ensayo, donde tendremos el punzón. Seguidamente, iniciaremos la

penetración con el indentador piramidal de diamante durante los segundos requeridos para la fuerza seleccionada e introducida previamente; 300g.

Una vez ya tengamos la marca de la huella, tenemos que medir las longitudes de las dos diagonales del rombo (L_1 y L_2); han de tener el mismo valor puesto que la microestructura del material es homogénea.

Para ello, debemos volver a la función de visión; 200x. Estas se miden manualmente observando a través de microdurómetro y moviendo las líneas negras con un micrómetro implantado en el exterior de la máquina. Inicialmente hemos de cerciorarnos de que ambas líneas se sitúan en el vértice izquierdo del rombo y, además, el micrómetro se encuentra en 0mm. Después, iremos ajustando una de las líneas hasta que coincida con el vértice derecho del rombo. Una vez lo hayamos logrado, podremos hacer la lectura de la medida requerida en el micrómetro.

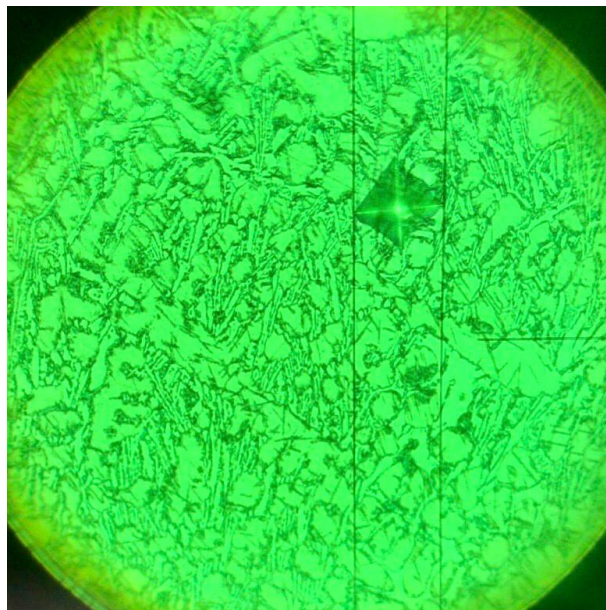


Ilustración 60. Huella ensayo Vickers

Por último, introduciremos las medidas obtenidas en el microdurómetro para que nos devuelva el valor de la dureza de Vickers.

8.3. RESULTADOS

De nuevo, los datos que buscamos provendrán de las cuatro mismas zonas que hemos observado al microscopio en el ensayo micrográfico. Estas son el metal base no afectado por la soldadura, el metal próximo a la interfase (ZAT), la interfase y el cordón de soldadura.

Repetiremos el ensayo 3 veces en cada una de las zonas y después haremos una media de los valores obtenidos. De este modo, obtendremos resultados más fiables.

8.3.1. PROBETA CON PRECALENTAMIENTO A 450°C

Ensayo	Metal base	Metal base próximo a interfase	Interfase	Cordón de soldadura
1	303,7 HV	402,2 HV	850,0 HV	476,1 HV
2	286,4 HV	361,5 HV	824,2 HV	471,0 HV
3	256,8 HV	330,7 HV	874,0 HV	515,7 HV
Media	282,3 HV	364,8 HV	849,4 HV	487,6 HV

Tabla 3. Resultados dureza Vickers con precalentamiento a 450°

8.3.2. PROBETA SIN TRATAMIENTO TÉRMICO

Ensayo	Metal base	Metal base próximo a interfase	Interfase	Cordón de soldadura
1	275,1 HV	413,4 HV	877,4 HV	585,5 HV
2	286,4 HV	339,1 HV	884,7 HV	576,0 HV
3	307,4 HV	376,0 HV	907,3 HV	615,7 HV
Media	289,6 HV	376,2 HV	889,8 HV	592,4 HV

Tabla 4. Resultados dureza Vickers sin tratamiento térmico

8.3.3. PROBETA CON TRATAMIENTO TÉRMICO RECOCIDO A 900°C Y ENFRIAMIENTO EN HORNO

Ensayo	Metal base	Metal base próximo a interfase	Interfase	Cordón de soldadura
1	133,9 HV	129,8 HV	389,7 HV	566,7 HV
2	143,4 HV	127,8 HV	343,4 HV	548,7 HV
3	131,8 HV	125,8 HV	326,7 HV	540,0 HV
Media	136,4 HV	127,8 HV	353,3 HV	551,8 HV

Tabla 5. Resultado dureza Vickers con tratamiento térmico recocido a 900°C

8.3.4. COMPARACIÓN DE LAS TRES PROBETAS EN CADA ZONA

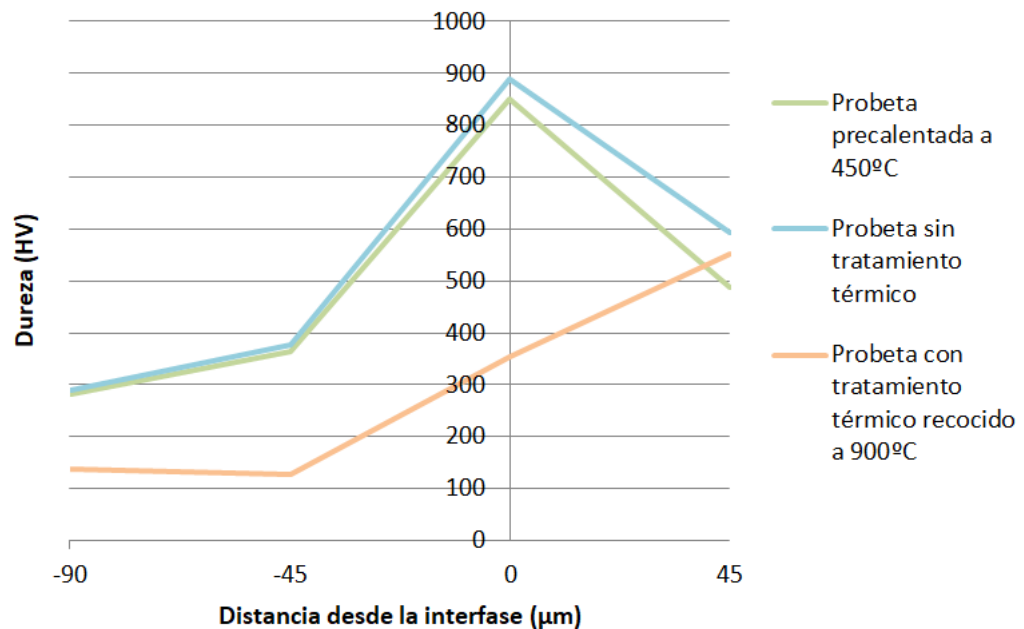


Ilustración 61. Gráfica durezas Vickers en diferentes zonas de la soldadura y con diferentes tratamientos térmicos

En la gráfica, podemos observar como la dureza aumenta significativamente en la interfase de la soldadura cuando no se ha realizado



ningún tratamiento térmico por las tensiones generadas en los cambios bruscos de temperatura. Los valores salen similares pero inferiores al haber precalentado, ya que dichos gradientes de enfriamiento y calentamiento no son tan pronunciados. Y, habiendo hecho un tratamiento térmico de recocido podemos observar, sobre todo en la zona de la interfase, cómo la dureza se estabiliza y aumenta de manera progresiva desde el metal base hasta el cordón de soldadura al haber homogeneizado la microestructura del material.

Además, tras ver los resultados, podemos contrastar las durezas obtenidas con sus correspondientes microestructuras para así, corroborar los constituyentes que conforman al material según el tratamiento al que ha sido sometido.

Así pues, cabe aclarar que las mediciones de dureza tomadas en la interfase de la soldadura con tratamiento térmico de recocido a 900°C indican que debe quedar todavía algo de martensita o ledeburita que no se ha disuelto totalmente, aunque no se aprecie en la *Ilustración 56*.

Salvo esta apreciación, los valores de dureza obtenidos se corresponden al análisis de los constituyentes realizado en el ensayo micrográfico.

9. ENSAYO DE TRACCIÓN

Se denomina tracción al esfuerzo al que se ve sometido una pieza al ser estirada. Es decir, al aplicar sobre ella dos fuerzas con la misma dirección y sentido opuesto.

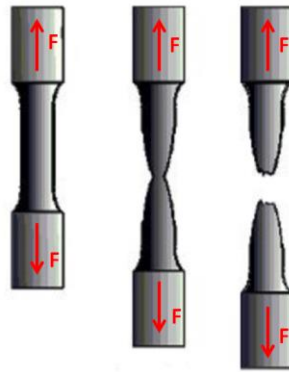


Ilustración 62. Ensayo a tracción

El estudio de la resistencia a tracción que tienen los materiales es imprescindible para cualquiera de los usos para los que va a ser destinado.

Es por ello que, el ensayo de tracción es el más utilizado para definir las propiedades mecánicas que nos puede ofrecer cada material. Es un tipo de ensayo destructivo y con su ejecución podemos obtener el módulo de Young, el límite elástico, el límite de fluencia, el coeficiente de Poisson, la elongación adquirida y la carga de rotura; entre otros, para así determinar cuán dúctil o no es un material. Todos estos parámetros pueden calcularse o conocerse a partir de la curva Esfuerzo-Deformación unitaria.

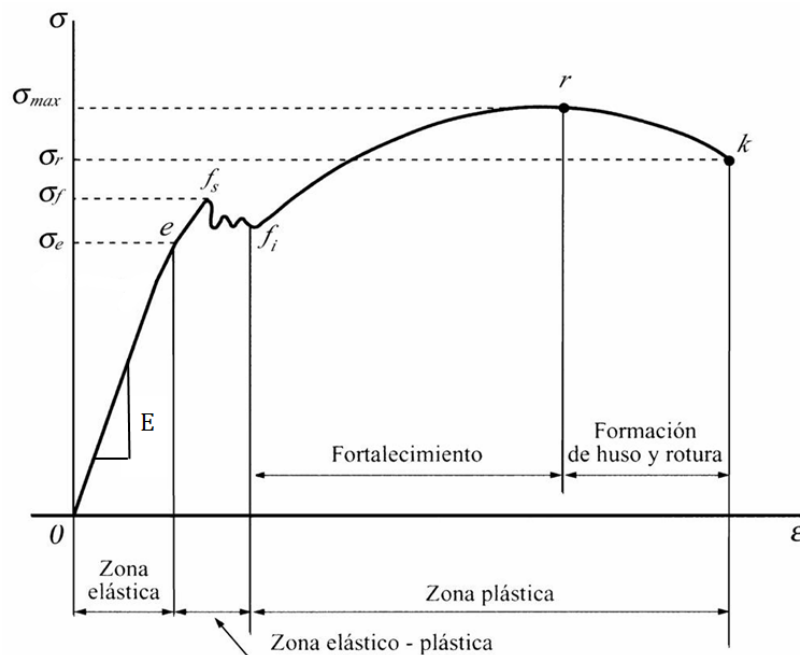


Ilustración 63. Diagrama tensión-deformación

○ MÓDULO DE YOUNG (E)

O también llamado Módulo de elasticidad, mide la rigidez de un material. Para ello, relaciona los incrementos de tensión aplicados con los incrementos de deformación longitudinal unitaria y, es un parámetro único para cada material.

Un valor de módulo de Young bajo significa que un sólido es elástico y, un valor de módulo alto quiere decir pues, que un sólido es rígido. Por lo que, la ductilidad aumenta con la inclinación de la pendiente y es constante durante el comportamiento elástico del material; de ahí que esa zona elástica del diagrama desde 0 hasta e sea lineal.

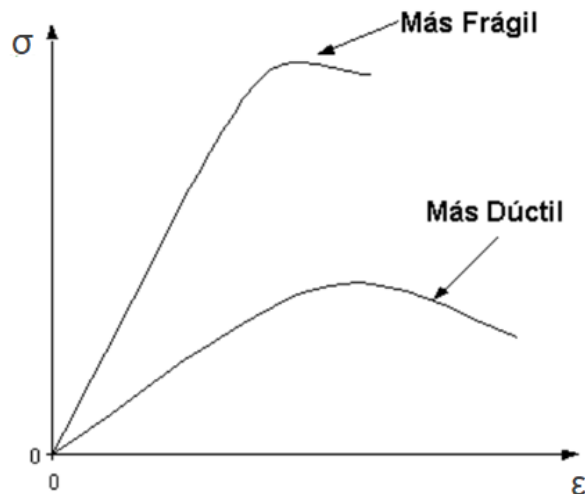


Ilustración 64. Diagrama comparativo de material dúctil y frágil

El Módulo de Elasticidad suele medirse en MPa ($1\text{MPa} = 1\text{N}/\text{mm}^2$) su valor se halla con la siguiente ecuación:

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

Ecuación 2. Módulo de Young

Donde:

F_e : Carga elástica en N.

l_0 : Longitud inicial de la probeta en mm.

$\Delta l = l - l_0$: Incremento de longitud de la probeta en mm.

A : Sección de la probeta en mm^2 .

$\sigma = F_e/A$: Tensión de tracción aplicada en N/mm^2 .

$\varepsilon = l_0/\Delta l$: Alargamiento longitudinal unitario sin unidades.

- LÍMITE ELÁSTICO

Este es el valor máximo de tensión (σ_e) que se le puede aplicar al cuerpo, sin la aparición de deformaciones permanentes; o lo que es lo mismo, deformaciones plásticas. Es decir, una vez se le deje de aplicar dicho esfuerzo, el cuerpo recobrará su apariencia inicial.

- LÍMITE DE FLUENCIA

O también llamado límite elástico aparente. Es el valor correspondiente a la tensión (σ_f) donde el cuerpo adquiere una repentina deformación plástica o elástica sin un aumento aparente de la carga aplicada. En el diagrama esta zona de fluencia corresponde con la comprendida entre f_s y f_i .

Este fenómeno es debido al impedimento de la red cristalina a sufrir dislocaciones por la presencia de impurezas o elementos de aleación. Dicho bloqueo no tiene por qué darse en todos los elementos.

- TENSIÓN DE ROTURA

La cual es la máxima tensión (σ_{max}) que la probeta puede soportar previamente a su fractura. Esta corresponde con el punto más alto del diagrama (r) y; como podemos observar en los diagramas tensión-deformación presentes en este punto, cuanto mayor deformación (ϵ) pueda soportar el material antes de romper, mayor será su ductilidad.

En la siguiente ecuación relacionaremos la tensión de rotura, con la carga aplicada en el ensayo; la cual podemos extraer a partir del ensayo, y la influencia que tiene sobre ellas el área sobre la que trabajaremos:

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

Ecuación 3. Tensión de rotura

Donde:

F_r : Carga máxima de rotura en N.

A : Sección transversal inicial de la probeta en mm².

Por lo que, cuanto menor sea el área transversal inicial de la probeta, mayor tensión de rotura obtendremos para una carga aplicada análoga; lo que da lugar a una elongación mayor. Para solventar este inconveniente, tendremos que buscar una relación de tensiones aplicadas y deformaciones unitarias obtenidas razonable con el resultado que esperamos.

○ COEFICIENTE DE POISSON

Cuantifica la razón entre el alargamiento longitudinal y el acortamiento transversal de la probeta; ambas referidas a la dirección del esfuerzo aplicado. Este es adimensional, positivo y comprendido entre los vales 0 y 0,5. Para hallar su valor hemos de emplear la siguiente fórmula:

$$\nu = - \frac{\varepsilon_{trans}}{\varepsilon_{long}}$$

Ecuación 4. Coeficiente de Poisson

El signo negativo es debido a que el valor de ν , como ya se ha comentado en el párrafo anterior, ha de ser positivo. En cambio, en el ensayo a tracción, longitudinalmente se produce un alargamiento; valor positivo, y transversalmente un acortamiento; valor negativo. Por lo que, para solventar este problema, realizaremos dicho cambio en la ecuación en cuestión.

○ PORCENTAJE DE ELONGACIÓN

O también conocido como porcentaje de alargamiento, mide el incremento de longitud que ha adquirido la probeta tras la aplicación del esfuerzo. Este es una relación entre el incremento de longitud y la longitud inicial de esta.

Normalmente, suele emplearse para materiales más dúctiles ya que, son los que adquieren deformaciones más grandes. Así pues, a mayor ductilidad, mayor será el porcentaje de elongación. Y a mayor fragilidad, mayor tendencia a obtener valores pequeños o próximos a cero.

Por lo que, podemos afirmar que esta cifra cuantificará la ductilidad del material y, se calcula empleando la siguiente ecuación:

$$\varepsilon (\%) = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100 = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100$$

Ecuación 5. Porcentaje de elongación

Donde:

l : longitud final de la probeta.

l_0 : longitud inicial de la probeta.

$\Delta l = l - l_0$: Incremento de longitud de la probeta.

Únicamente hemos de cerciorarnos de que todas las longitudes están puestas en la misma unidad de medida y como podemos deducir, el valor final de la ecuación estará expresado en porcentaje (%).

9.1. EQUIPO EMPLEADO

Para la obtención de todas las propiedades mecánicas explicadas anteriormente de nuestras probetas, emplearemos una máquina universal de tracción MOHR & FEDERHAFF AG.

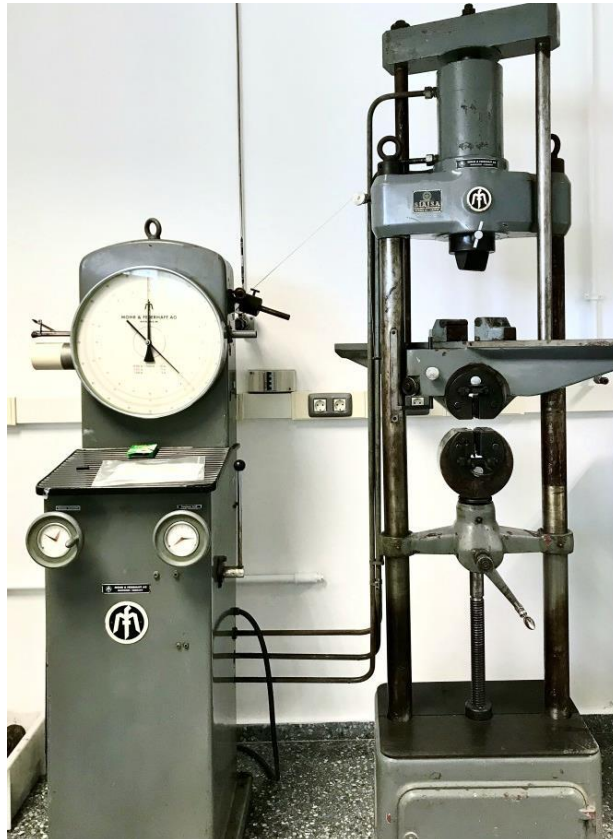


Ilustración 65. Máquina universal de tracción MOHR & FEDERHAFF AG

Esta consta de dos partes. Por un lado, la máquina que nos permite controlar manualmente mediante una palanca, el incremento de la fuerza de tracción aplicada sobre la probeta. Asimismo, esta está complementada con un dinamómetro que nos irá indicando el valor de la fuerza. Dicho indicador consta de dos agujas; la que se desplaza conforme a la fuerza aplicada y, la conducida por la anterior. Cuando la probeta rompa, la primera volverá al valor nulo mientras que, la conducida permanecerá en el último valor marcado, es decir, el de fuerza de rotura. Además, también nos proporcionará un diagrama de incremento de longitud-fuerza aplicada para cada una de las probetas ensayadas. Y, por otro lado, tendremos la herramienta encargada de suministrarle las fuerzas de tracción a nuestras piezas. Esta está integrada por dos cabezales; el de arriba, que cuenta con la incorporación de un cilindro hidráulico responsable de la aplicación de la carga y; el de bajo, con movilidad en el eje vertical para el sujeción de la probeta. Ambos cuentan con un amarre para la colocación firme de nuestras piezas.

9.2. PROCEDIMIENTO

Inicialmente, mediremos el área transversal de la zona soldada de cada probeta con un pie de rey. Además hemos de señalar cada una de las piezas para tenerlas bien localizadas.

Después, encenderemos la máquina y, lo primero que hemos de hacer es situar la pieza a ensayar en la parte donde se va a traccionar. Para ello, bajaremos el cabezal inferior hasta que sea posible insertar la parte deseada de la probeta; sin que se tope con el cabezal más alto. Posteriormente, haremos que ascienda al mismo tiempo que abrimos el amarre superior para introducir la zona opuesta de la probeta. La distancia que debemos dejar libre ha de ser el cordón de soldadura y algo de chapa.

Una vez tengamos la probeta lista para realizarle el ensayo, nos cercioraremos de que ambas agujas del dinamómetro estén situadas en el punto de partida para empezar a medir desde cero. Además, también comprobaremos que se va a empezar a dibujar un nuevo diagrama de fuerza aplicada-elongación; que posteriormente podremos convertir fácilmente en la de tensión-deformación.

Finalmente, podremos ensayar la pieza. Para ello, tiraremos lentamente de la palanca hasta que la probeta rompa.

9.3. RESULTADOS

Como ya he comentado previamente, del ensayo a tracción podemos extraer directamente los datos la deformación adquirida por la probeta en función a la fuerza aplicada hasta la rotura.

La fuerza que nos proporciona la máquina es en aplicada en kilopondios (kp); la cual podemos pasar a Newton gracias a la proporción $1kp=9,8N$. Asimismo, podremos calcular fácilmente la tensión ya que, habremos medido las áreas requeridas en la operación con anterioridad.

Puesto que el objetivo de este proyecto es seleccionar el tipo de tratamiento que convendría hacerle a la soldadura de unas piezas determinadas, tan solo necesitamos hacer la comparativa de los alargamientos producidos y de las tensiones soportadas. Por lo que no será necesario hallar el resto de parámetros explicados.

De nuevo realizaremos varios ensayos para cada uno de los casos a analizar y, posteriormente haremos una media de los valores obtenidos.

9.3.1. PROBETA CON PRECALENTAMIENTO A 450°C

Probeta	Alargamiento	Fuerza de rotura	Superficie	Tensión de rotura
1	4,5 mm	23,520 kN	62,25 mm ²	377,83 MPa
2	3,4 mm	23,128 kN	61,25 mm ²	377,60 MPa
3	3,8 mm	24,206 kN	56,75 mm ²	426,54 MPa
Media	3,9 mm	23,618 kN	60,08 mm²	393,09 MPa

Tabla 6. Resultados ensayo a tracción con precalentamiento a 450°

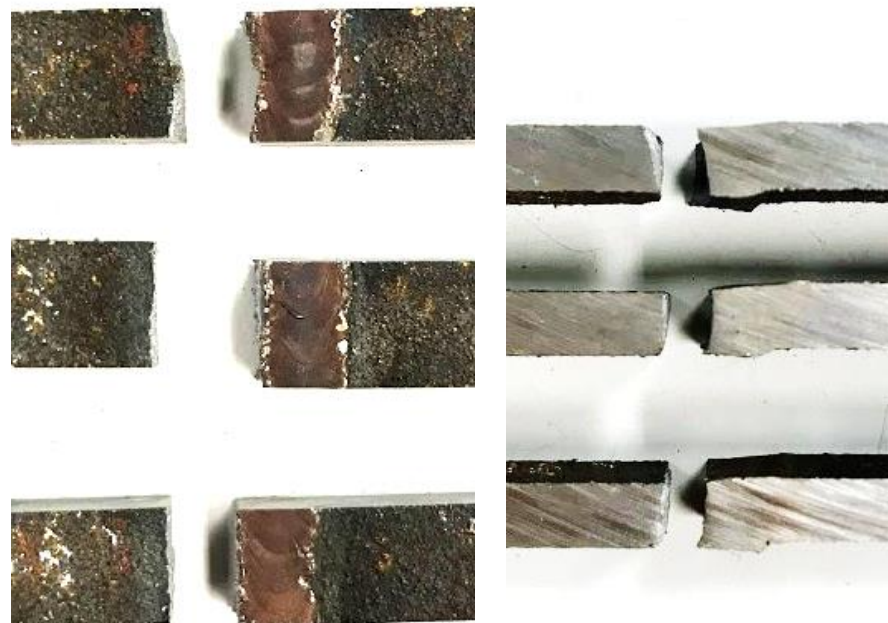


Ilustración 66. Probetas con precalentamiento a 450°C ensayadas a tracción

9.3.2. PROBETA SIN TRATAMIENTO TÉRMICO

Probeta	Alargamiento	Fuerza de rotura	Superficie	Tensión de rotura
1	5,0 mm	21,364 kN	78,75 mm ²	271,29 MPa
2	0,9 mm	4,998 kN	39,30 mm ²	127,18 MPa
3	3,7 mm	10,878 kN	50,80 mm ²	214,13 MPa
4	4,0 mm	18,522 kN	45,19 mm ²	409,89 MPa
Media	3,4 mm	13,940 kN	53,51 mm²	260,52 MPa

Tabla 7. Resultados ensayo a tracción sin tratamiento térmico



Ilustración 67. Probetas sin tratamiento térmico ensayadas a tracción

9.3.3. PROBETA CON TRATAMIENTO TÉRMICO RECOCIDO A 900°C Y ENFRIAMIENTO EN HORNO

Probeta	Alargamiento	Fuerza de rotura	Superficie	Tensión de rotura
1	4,6 mm	23,520 kN	55,13 mm ²	426,67 MPa
2	6,5 mm	29,204 kN	71,00 mm ²	411,32 MPa
3	3,6 mm	18,424 kN	59,85 mm ²	307,84 MPa
4	4,1 mm	20,286 kN	48,80 mm ²	415,67 MPa
Media	4,7 mm	22,858 kN	58,69 mm²	389,45 MPa

Tabla 8. Resultado ensayo a tracción con tratamiento térmico recocido a 900°C



Ilustración 68. Probetas con tratamiento térmico recocido a 900°C ensayadas a tracción

9.3.4. COMPARACIÓN DE LAS TRES PROBETAS

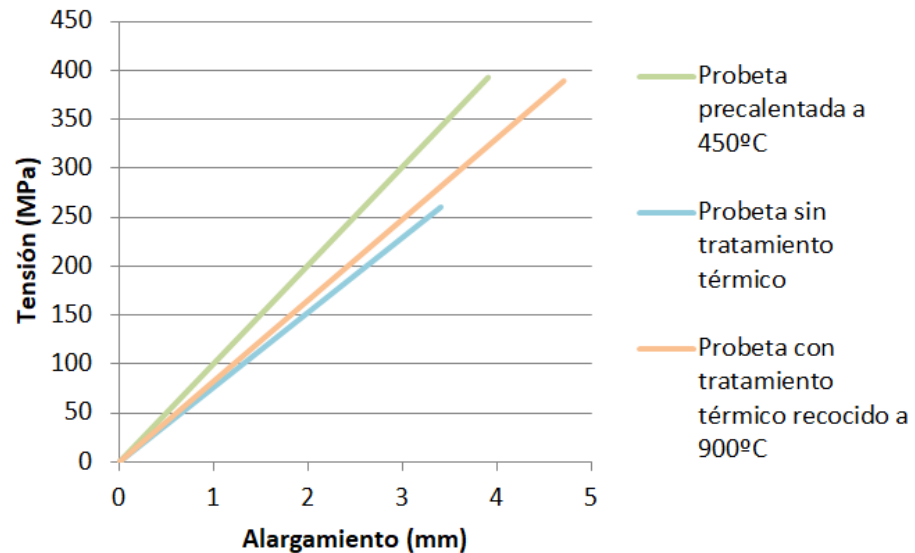


Ilustración 69. Diagrama Tensión-Alargamiento para probetas con diferentes tratamientos térmicos

En el diagrama podemos observar como la probeta precalentada soporta una tensión similar a la que hemos sometido a un tratamiento térmico y además, sufre deformaciones similares a la probeta sin tratamiento térmico.

Por otro lado, la probeta con tratamiento térmico de recocido supera tensiones elevadas con deformaciones también muy altas debido a la homogeneidad estructural adquirida en dicho tratamiento térmico; ha mejorado su ductilidad. Lo contrario que con la probeta sin tratamiento térmico, que es la que menores tensiones soporta y en la que menores deformaciones se producen; al no haber realizado sobre ella ningún tratamiento térmico mantiene su fragilidad.

Finalmente, cabe hacer la aclaración de que la mayoría de las probetas han roto por la ZAC (Zona Afectada por el Calor) ya que, es donde se produce una mayor acumulación de tensiones como consecuencia de la transformación y, además, es la zona donde más tensiones residuales podemos encontrar.

10. ENSAYO DE CORROSIÓN

La corrosión es el deterioro que adquiere un material como respuesta al ambiente que lo rodea. Esta se origina por la necesidad que tienen químicamente los materiales de buscar su estabilidad interna cuando las condiciones a las que están expuestos no son favorables. El proceso de corrosión consiste en una cesión de electrones del elemento oxidado a oxidante. Además, todo material metálico está sujeto a este tipo de inconveniente; aunque también se puede dar en materiales no metálicos y, en la industria, un material corroído puede acarrear consecuencias nefastas.

Podemos encontrar diferentes tipos de corrosión, entre los más comunes:

- Uniforme: Se produce una pérdida de metal regular en toda la superficie.
- Localizada: La corrosión ocurre en una zona discreta del metal, puede ser a gran o a pequeña escala y muchos tipos de corrosión derivan de este.
- Atmosférica: Se da por la reacción del metal por el contacto con los elementos presentes en la atmósfera en la que se encuentre.
- Galvánica: Cuando dos metales distintos se unen eléctricamente en presencia de una solución conductora.
- Por cavitación: El metal está en contacto con algún líquido y, se forma burbujas en su superficie debido a algún movimiento por cualquiera de las partes.
- Intergranular: Se presenta generalmente a partir de un tratamiento térmico del material; este causará un efecto de sensibilización del metal haciéndolo más susceptible a la corrosión.

Así pues, el ensayo de corrosión consiste en exponer el material que queremos estudiar a condiciones corrosivas extremas para determinar su resistencia ante estas y, de este modo, poder evaluar sus propiedades mecánicas.

10.1. MÉTODO Y EQUIPO EMPLEADO

El método que vamos a seguir para estudiar la resistencia a corrosión de nuestras diferentes probetas soldadas será un procedimiento destructivo que, relaciona la variación de masa de cada pieza con el daño sufrido por la corrosión. Para llevarlo a cabo hemos de dejarlas totalmente sumergidas durante tres días en una disolución salina de cloruro férrico al 15% ($\text{FeCl}_3 - 15\%$).

En el presente trabajo, hemos de analizar y seleccionar el tipo de proceso que le convendría a la soldadura de unas piezas con un uso determinado, las cuales se ven expuestas la mayor parte del tiempo a estar en ambientes húmedos o en contacto directo con el agua. Es por eso que hemos decidido hacer el ensayo basado en la sumersión completa.

El peso de las probetas previo y posterior a la corrosión lo mediremos con la balanza analítica y de precisión KERN 770.



Ilustración 70. Balanza analítica y de precisión KERN 770

10.2. RESULTADOS

Tras la corrosión, las piezas quedaron con el siguiente aspecto.



Ilustración 71. Probetas corroídas

Probeta	Peso previo	Peso posterior	Variación	% de pérdida de masa
Con precalentamiento a 450°C	38,429 g	37,153 g	1,276 g	3,320
Sin tratamiento térmico	39,365 g	37,695 g	1,670 g	4,242
Con recocido a 900°C	37,345 g	36,561 g	0,784 g	2,099

Tabla 9. Pérdida de masa por corrosión

Podemos observar que cuanto menos hemos estabilizado la microestructura con tratamientos térmicos, más pérdida de masa. Además, el cordón de soldadura de la probeta con tratamiento térmico de recocido también se ve considerablemente menos corroído.

También podemos ver que el metal base de la probeta con recocido se ha corroído de una manera más uniforme en comparación a las otras dos.



11. PLIEGO DE CONDICIONES TÉCNICAS

A continuación enumeraremos la normativa seguida en cada proceso, así como la maquinaria, los equipos de protección y los procedimientos empleados.

11.1. UNIÓN DE CHAPAS

- EQUIPO Y MATERIAL UTILIZADO
 - Sierra de cinta con accionamiento manual
 - Soldador TRANSTIG 1700
 - Botella de gas argón
 - Amoladora angular
 - Sargento
- EQUIPO DE PROTECCIÓN INDIVIDUAL
 - Careta protectora para soldar automática
 - Guantes de aislamiento térmico
 - Botas de seguridad
 - Mandil
 - Polainas
 - Bata
- NORMATIVA
 - Norma NTP 92 para el uso de sierras de cinta
 - Norma ASTM A380 para la soldadura de aceros inoxidables
 - Norma EN292 para la protección en el proceso de soldeo

11.2. CORTE DE PROBETAS PARA ANÁLISIS Y ENSAYOS

- EQUIPO Y MATERIAL UTILIZADO
 - Tronzadora para metales con refrigeración
 - Tornillo de banco
- EQUIPO DE PROTECCIÓN INDIVIDUAL
 - Guantes de protección
 - Gafas de protección
 - Botas de seguridad



- Bata
- NORMATIVA
 - Norma NTP 133 para el uso de tronzadoras

11.3. ENSAYO DE MICROGRAFÍA

- EQUIPO Y MATERIAL UTILIZADO
 - Presa de montaje caliente Struers LaboPress-3
 - Compuesto termoendurecible
 - Máquina de pulido Struers LaboPol-21
 - Papel de lija 220, 500 y 1000 granos/pulgada
 - Pasta de diamante 3 μm
 - Aceite de pulido
 - Reactivo Nital-3
 - Alcohol
 - Secador
 - Microscopio Nikon Microphot-FX
- EQUIPO DE PROTECCIÓN INDIVIDUAL
 - Gafas de protección
 - Guantes
- NORMATIVA
 - Norma UNE-EN ISO 643:2013 para determinar el tamaño de grano en metales

11.4. ENSAYO DE DUREZA

- EQUIPO Y MATERIAL UTILIZADO
 - Microdurómetro INNOVATEST 400^a SERIES
- EQUIPO DE PRTECCIÓN INDIVIDUAL
 - Guantes
- NORMATIVA



- Norma UNE-EN ISO 6507-1 para ensayos de dureza Vickers
- Norma ASTM E384 para ensayos de dureza Vickers

11.5. ENSAYO DE TRACCIÓN

- EQUIPO Y MATERIAL UTILIZADO
 - Máquina universal de tracción MOHR & FEDERHAFF AG
 - Papel milimetrado
 - Bolígrafo
- EQUIPO DE PRTECCIÓN INDIVIDUAL
 - Gafas de seguridad
 - Guantes
- NORMATIVA
 - Norma ASTM E8 para ensayos de tracción
 - UNE-EN ISO 6892-1: Materiales metálicos. Ensayo a tracción. Parte 1: Método de ensayo a tracción a temperatura ambiente

11.6. ENSAYO DE CORROSIÓN

- EQUIPO Y MATERIAL UTILIZADO
 - Disolución salina de cloruro férrico al 15% ($\text{FeCl}_3 - 15\%$)
 - Recipiente para dejar las probetas sumergidas
 - Alcohol
 - Secador
 - Balanza analítica y de precisión KERN 770
- EQUIPO DE PRTECCIÓN INDIVIDUAL
 - Guantes
 - Gafas de protección
- NORMATIVA
 - Norma UNE-EN ISO 9227:2017 para ensayos de corrosión

12. CONCLUSIÓN

Una vez realizados los ensayos y tras haber obtenido los resultados requeridos en estos, podremos establecer qué tratamiento térmico es más conveniente en las soldaduras de fundición dúctil por procedimiento TIG y aporte ER de AISI 316L a la hora de solventar problemas surgidos en piezas para bastidores de grandes camiones, bombas hidráulicas y válvulas de conducción de agua.

Así pues, como característica general podemos afirmar que la probeta que hemos sometido a un tratamiento térmico de recocido a 900°C es la que ha logrado mejores resultados de ductilidad, de tracción y de corrosión en todas las zonas estudiadas. Esto se debe a la reorganización microestructural adquirida en el post-calentamiento. Además, dicha homogeneidad provoca también que el material adquiera mayores deformaciones antes de su fractura, lo que quiere decir que adquiere mayor ductilidad para una misma carga aplicada.

Asimismo, la probeta que no ha sido sometida a ningún tratamiento térmico es la que peores resultados ha alcanzado en todos los ensayos realizados, sobre todo en la interfase de la soldadura. Esto se debe a la inestabilidad interna originada por los gradientes térmicos tan elevados a los que se ha visto expuesta la pieza; provocando una acumulación tensional las zonas afectadas por el calor desprendido en el proceso de soldeo. Dichas tensiones le confieren al material una gran fragilidad y mayores porcentajes en pérdida de masa al ser expuesto a ambientes corrosivos.

En cambio, la probeta que hemos precalentado ha adquirido unos valores intermedios entre los otros dos casos. La fragilidad del material es similar a la pieza sin tratamiento térmico. Pero las tensiones que soporta serán semejantes a las de la pieza sometida a recocido ya que, los gradientes térmicos a los que se ha visto expuesta en el proceso de unión no son tan elevados.

De las aclaraciones dadas en los párrafos anteriores podemos determinar que, para lograr buenos resultados en materiales que van a ser sometidos a esfuerzos de tracción elevados, que requieren de una alta ductilidad, y que van a ser expuestos a condiciones atmosféricas desfavorables; lo más recomendable es someter la unión a un post-tratamiento de revenido con enfriamiento lento. En cambio, si lo que deseamos es conseguir piezas duras, con alta resistencia al desgaste y que se van a ver expuestas a esfuerzos de fricción y condiciones atmosféricas adversas; lo más viable es someter a la pieza a un precalentamiento previo a la unión. Y por último, en el caso de que el material deba ser muy resistente al desgaste, siendo indiferente su fragilidad y su tolerancia a ambientes corrosivos; realizaremos la soldadura sin ningún tipo de tratamiento térmico.

En el caso de los bastidores de grandes camiones; estructura portante que se encarga de recibir el peso de la carrocería montada y de la carga de transporte para transmitirla a los ejes del vehículo, normalmente compuesta por dos largueros de acero dúctil; la mayoría

de fallos están relacionados con fracturas y grietas debidas a las grandes cargas y esfuerzos que han de soportar. Por lo que, a la hora de solventar fallos en esta estructura mediante procedimientos de soldeo, el método más viable; de los estudiados en este trabajo, será el de precalentamiento, ya que es capaz de soportar tensiones elevadas sin que se adquieran grandes deformaciones. En este caso, las condiciones atmosféricas a las que se ven expuestas estas piezas no son lo suficientemente dañinas como para determinar un método u otro en función al nivel de corrosión que pueda adquirir el material.



Ilustración 72. Bastidor de un camión

Mientras que, en bombas hidráulicas; dispositivo generador que consigue aumentar la velocidad, la altura o la presión de un fluido mediante la transformación de energía mecánica en energía hidráulica; los fallos que podemos encontrar suelen ser fracturas y grietas debidas a la circulación de fluidos a presión en su interior. Por lo que, de los diferentes métodos de soldeo estudiados en este proyecto, el más adecuado a la hora de solventar problemas en este tipo de sistemas es la aplicación de un precalentamiento térmico. Este es el método de soldeo que podrá aguantar la exposición a un ambiente corrosivo y además, la unión será lo suficientemente dura como para ser capaz de soportar el desgaste, los efectos adversos de las cavitaciones y las presiones a las que se va a ver sometida.

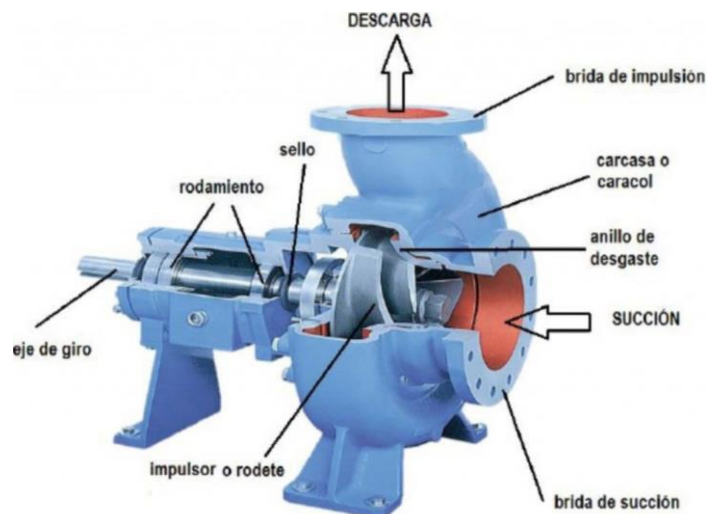


Ilustración 73. Bomba hidráulica

Para solventar problemas surgidos en válvulas de conducción de agua; dispositivo mecánico que controla el paso de un fluido, normalmente situado entre tuberías; los fallos a solventar suelen ser, al igual que en el mecanismo anterior, defectos causados por la circulación de fluidos en su interior. Así pues, para reparar fallos, seguiríamos el mismo razonamiento que para las bombas hidráulicas, escogiendo el tratamiento de precalentamiento.



Ilustración 74. Válvula de conducción de agua

Cabe añadir que, en este trabajo solo se ha podido estudiar un proceso de soldadura de entre todos los existentes. Por ello, la solución dada no tiene por qué ser la única. Así pues, también hay que tener en cuenta que cada fallo requerirá de una solución diferente y con unos métodos de actuación diferentes que, sería recomendable ahondaran sobre ello profesionales en el campo.

Por último, agradecerle a la Universidad Politècnica de Valencia y en concreto al personal que conforma el departamento de materiales por proveerme todos los medios, la documentación, los materiales y los equipos necesarios para poder llevar a cabo este Trabajo de Fin de Grado.

13. PRESUPUESTO

13.1. MATERIALES (A)

Ref.	Descripción	Ud.	Cant.	Precio Ud. (€)	Precio Total (€)
A.1.	Placa de fundición nodular dimensiones 100 x 300 x 5 mm	Ud.	2	16,50	33,00
A.2.	Electrodo de tungsteno	Ud.	1	2,55	2,55
A.3.	Varilla ER de AISI 316L	Ud.	6	1,75	10,50
A.4.	Gas argón	L	8	6,85	54,80
A.5.	Disco desbaste amoladora	Ud.	1	4,95	4,95
A.6.	Compuesto termoendurecible	kg	1	21,35	21,35
A.7.	Disco desbaste 220	Ud.	1	1,95	1,95
A.8.	Disco desbaste 500	Ud.	1	3,85	3,85
A.9.	Disco pulido diamante	Ud.	1	9,95	9,95
A.10.	Pasta pulido de diamante	Ud.	1	12,45	12,45
A.11.	Aceite para pulido	L	1	4,55	4,55
A.12.	Nital-3	L	1	5,95	5,95
A.13.	Alcohol	L	1	4,75	4,75
A.14.	Cloruro férrico	L	1	24,30	24,30
A.15.	Recipiente	Ud.	1	3,55	3,55
A.16.	Papel milimetrado	Ud.	1	0,55	0,55
A.17.	Bolígrafo	Ud.	1	0,95	0,95
TOTAL A					199,95

Tabla 10. Coste de los materiales empleados

13.2. MAQUINARIA EMPLEADA (B)

Ref.	Descripción	Ud.	Cant.	Precio Ud. (€)	Precio total (€)
B.1.	Sierra de cinta	h	1	40,00	40,00
B.2.	Horno tratamientos térmicos	h	18	15,00	270,00
B.3.	Equipo de soldadura	h	2,5	50,00	125,00
B.4.	Amoladora	h	1	10,00	10,00
B.5.	Tronzadora	h	2	40,00	80,00
B.6.	Presa de montaje caliente	h	1,5	50,00	75,00
B.7.	Máquina de pulido	h	1	30,00	30,00
B.8.	Microscopio	h	2,5	30,00	75,00
B.9.	Microdurómetro	h	3,5	30,00	105,00
B.10.	Máquina de tracción	h	2,5	50,00	125,00
	Balanza analítica	h	0,5	10,00	5,00
TOTAL B					940,00

Tabla 11. Coste por el uso de la maquinaria empleada

13.3. MANO DE OBRA (C)

Ref.	Descripción	Ud.	Cant.	Precio Ud. (€)	Precio total (€)
C.1.	Ayudante de laboratorio (Corte chapa inicial)	h	1	30,00	30,00
C.2.	Oficial de 1ª soldador (Preparación de equipos)	h	0,5	50,00	25,00
C.3.	Oficial de 1ª soldador (Proceso de soldeo)	h	3,5	50,00	175,00
C.4.	Ayudante de laboratorio (Corte probetas)	h	2	30,00	60,00
C.5.	Técnico de laboratorio (Ensayo micrográfico)	h	5	45,00	225,00
C.6.	Técnico de laboratorio (Ensayo de dureza)	h	3,5	45,00	157,50
C.7.	Técnico de laboratorio (Ensayo de tracción)	h	2,5	45,00	112,50
C.8.	Ayudante de laboratorio (Ensayo de corrosión)	h	0,5	30,00	15,00
C.9.	Mano de obra alumno	h	118	45,00	5310,00
TOTAL C					6110,00

Tabla 12. Coste de la mano de obra

13.4. PRESUPUESTO TOTAL

COSTE DEL PROYECTO	
Materiales	199,95 €
Maquinaria empleada	940,00 €
Mano de obra	6110,00 €
TOTAL	7249,95 €
IVA (21%)	1522,49 €
Costes indirectos (3%)	217,50 €
PRESUPUESTO TOTAL	8989,94 €

Tabla 13. Coste total

Así pues, el presupuesto total del proyecto ha sido de ocho mil novecientos ochenta y nueve euros con noventa y cuatro céntimos.



14. BIBLIOGRAFÍA

Diagrama hierro-carbono. Recuperado de:

<http://www.uca.edu.sv/facultad/clases/ing/m210031/Tema%2013.pdf>

Componentes principales del acero. Recuperado de:

<https://laboratoriodeforja2.wordpress.com/2016/08/29/el-acero/>

Soldadura fuerte y blanda. Recuperado de:

<https://soldaduras.online/fuerte-y-blanda/>

Tipos de soldadura. Recuperado de:

<http://www.gnccaldereria.es/tipos-de-soldadura/>

Soldadura TIG. Recuperado de:

<https://www.soldexa.com.pe/soldexa/sp/education/blog/proceso-de-soldadura-tig.cfm>

Tratamientos térmicos. Recuperado de:

<https://laboratoriodeforja2.wordpress.com/tratamientos-termicos-2/>

Defectos en la soldadura, causas y soluciones. Recuperado de:

<https://metfusion.wordpress.com/2013/08/10/defectos-en-la-soldadura-causas-y-soluciones/>

Ensayo de tracción. Recuperado de:

<https://www.areatecnologia.com/materiales/ensayo-de-traccion.html>

Bastidores de grandes camiones. Recuperado de:

<https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn14.html>

Daños en los bastidores de camiones. Recuperado de:

<https://studylib.es/doc/5777105/da%C3%B1os-en-los-bastidores-de-camiones>

Bombas hidráulicas. Recuperado de:

<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.3/36653/9788476538937.pdf>

Normativas:

<https://www.aenor.com/normas-y-libros/buscador-de-normas>

Aguilar Schafer, J.A. *Soldadura de Arco Eléctrico.*

J. APRAIZ, *Fundiciones.* Editorial Dossat, S.A. Madrid, España, 1981 pp. 144-145.

Manuel Pascual, Enrique Ballester, Fidel Salas, J.L. Cabrelles *Análisis de la soldabilidad en fundición de grafito esferoidal con electrodos revestidos al 56 y 97,6% de Ni*

Cárcel Carrasco, F.J., Pascual Guillamón, M., Salas Vicente, F. y Donderis Quiles, V. (2019) *Influence of Heat Treatment in the Microstructure of a Joint of Nodular Graphite Cast Iron when Using the Tungsten Inert Gas Welding Process with Perlitic Grey Cast Iron Rods as Filler Material.*

Moya López, A. V. y Vaca Guato, M. J. (2016) *Evaluación de la Soldabilidad del hierro fundido nodular con proceso de soldadura GTAW.*

Castro. G. (2009) *Fundiciones.*

Saiz, M.J. *Tema 3, Parte2: Aleaciones Fe-C*

Anón. *Módulo III: Soldadura. Tema 10: Procesos básicos de soldadura.* Recuperado de Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Bilbao

Batista Espinosa, Y. (2017) *Variaciones microestructurales de una fundición nodular sometida a soldadura con electrodos revestidos.*

Anón. *Tema VIII Materiales Metálicos. Lección 11. Aleaciones Férricas.* Recuperado de Universidad de Cantabria.

Cárcel Carrasco, F.J., Pérez Puig, M.A, Pascual Guillamón, M. y Pascual Martínez, R. (2016) *An análisis of the Weldability of Ductile Cast Iron Using Inconel 625 for the Root Weld and Electrodes Coated in 97.6% Nickel for the Filler Welds.*

Carburos Metálicos. (2018) *Manual del soldador. Soldadura con gas de protección, oxicorte y corte por plasma.*

Salvador de las Heras. (2011) *Fluidos, bombas e instalaciones hidráulicas.* Recuperado de la Universitat Politècnica de Catalunya.

Bosser, J. *Vademecum de mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas.* Centre de Publicacions d'Abast. ETSEIB.