



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA
Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales

CORROSIÓN BAJO TENSIÓN EN LA SOLDADURA DE ACERO INOXIDABLE EN AMBIENTES CORROSIVOS

Autor del trabajo:

Sergio Montesinos Gasent

Titulación:

Grado de Ingeniería Mecánica

Director del trabajo:

Manuel Pascual Guillamón

Curso académico:

2019-2020

Índice General

Capítulo 1 Memoria Descriptiva	1
1. Objetivos	1
2. Antecedentes	1
3. Acero inoxidable y tipos.....	3
3.1. Acero inoxidable	3
3.2. Tipos de aleaciones de acero inoxidable	3
3.2.1. Aceros inoxidables martensíticos.....	4
3.2.2. Aceros inoxidables ferríticos.....	5
3.2.3. Aceros inoxidables austeníticos	7
3.2.4. Aceros inoxidables dúplex	9
3.2.5. Aceros inoxidables endurecibles por precipitación.....	9
3.3. Ferrita, Austenita, Martensita, Cementita, Perlita y Soluciones Sólidas	11
3.3.1. Ferrita y Austenita.....	11
3.3.2. Soluciones sólidas	12
3.3.3. Propiedades de la Ferrita.....	12
3.3.4. Propiedades de la Austenita	13
3.3.5. Propiedades de la Cementita	14
3.3.6. Propiedades de la Perlita	15
3.3.7. Propiedades de la Martensita	15
3.4. Diagrama Cromo-Hierro	16
3.4.1. Análisis del diagrama de cromo-hierro	17
3.4.2. Influencia del carbono.....	17
4. Corrosión en los aceros inoxidables	18
4.1. Bases de la corrosión.....	18
4.2. Tipos de corrosión.....	20
4.2.1. Corrosión húmeda generalizada.....	20
4.2.2. Corrosión húmeda localizada (intergranular).....	20

4.2.3. Corrosión húmeda localizada (por picaduras – Pitting)	21
4.2.4. Corrosión húmeda localizada (galvánica)	21
4.2.5. Corrosión húmeda localizada (bajo tensión – SCC)	21
4.2.6. Corrosión húmeda localizada (grietas).....	21
4.2.7. Corrosión por fatiga	22
4.2.8. Corrosión marina	22
5. Soldadura en los aceros inoxidables	22
5.1. Tipos de soldadura	22
5.2. Aspectos operativos.....	23
5.2.1. Soldadura a derecha	23
5.2.2. Soldadura a izquierda.....	24
5.2.3. Soldadura en vertical.....	24
5.2.4. Soldadura en cornisa	25
5.2.5. Soldadura en techo	26
5.3. Operaciones de corte y montaje	26
5.4. Preparación de bordes	27
5.5. Punteado y alineación de la soldadura.....	30
5.6. Material de respaldo.....	31
5.7. Nivel de penetración.....	32
5.8. Humedad	32
5.9. Limpieza.....	33
5.10. Ventilación	34
5.11. Procesos de soldadura más empleados en aceros inoxidables.....	34
5.11.1. Soldadura por arco manual con electrodo revestido (SMAW).....	34
5.11.1.1. Electrodo y fabricación	35
5.11.1.2. Composición del revestimiento.....	36
5.11.1.3. Funciones del revestimiento	36
5.11.1.4. Especificaciones	38
5.11.1.5. Tipo de corriente.....	38
5.11.1.6. Aplicaciones	39

5.11.2. Soldadura por arco bajo gas protector con electrodo no consumible (GTAW) .	39
5.11.2.1. TIG con arco pulsado.....	40
5.11.2.2. Varillas consumibles.....	41
5.11.2.3. Gases de protección	41
5.11.2.4. Electrodo no consumibles	42
5.11.2.5. Tipos de electrodo no consumibles	43
5.11.2.6. Acabado del extremo	43
5.11.2.7. Selección del tipo de corriente.....	44
5.11.2.8. Equipamiento del equipo soldadura TIG	45
5.11.2.9. Ventajas y limitaciones del proceso TIG (GTAW).....	47
5.11.2.10. Soldadura Plasma Arc Welding (PAW).....	47
5.11.3. Soldadura por arco bajo gas protector con electrodo consumible (GMAW)	49
5.11.3.1. Influencia de los parámetros	49
5.11.3.2. Tipos de transferencia del metal	51
5.11.3.3. Productos de aporte (hilos)	52
5.11.3.4. Gases de protección	53
5.11.3.5. Especificaciones	56
5.11.3.6. Instalación soldadura GMAW	57
5.11.3.7. Ventajas y limitaciones del proceso GMAW.....	58
5.11.3.8. Defectos en la soldadura GMAW y causas.....	58
5.11.3.9. Selección del gas de protección	60
6. Soldabilidad en los aceros inoxidables	61
6.1. Concepto de soldabilidad	61
6.2. Energía de aportación.....	61
6.3. Balance térmico en los procesos de soldadura	62
6.4. Zonas características de la soldadura	62
6.5. Zona afectada térmicamente.....	63
6.6. Velocidad de enfriamiento y dilución	64
6.7. Absorción de gases en el metal fundido	64
6.8. Pre calentamiento	65

6.9 Precipitados y fases intermetálicas.....	66
6.10. Soldabilidad de los aceros inoxidables austeníticos	69
6.11. Soldabilidad de los aceros inoxidables ferríticos	70
6.12. Soldabilidad de los aceros inoxidables martensíticos.....	71
6.13. Soldabilidad de los aceros inoxidables dúplex.....	71
7. Selección de electrodos para aceros inoxidables	72
7.1. Medición del contenido de ferrita por instrumentos magnéticos.....	72
7.2. Medición del contenido de ferrita por examen metalográfico.....	72
7.3. Medición del contenido de ferrita por composición química	73
7.4. Diagrama de Schaeffler y DeLong	73
8. Seguridad en la soldadura al arco.....	78
8.1. Protección personal	78
8.2. Protección de la vista.....	78
8.3. Seguridad en el equipo de soldadura.....	79
8.3.1. Circuitos con corriente	80
8.3.2. Línea a tierra	80
8.3.3. Cambio de polaridad	80
8.3.4. Cambio del rango de amperaje.....	80
8.3.5. Circuito de soldadura	80
8.3.6. Riesgo de incendio.....	81
8.3.7. Ventilación.....	81
8.3.8. Humedad.....	81
9. Metodología aplicada para la obtención de las probetas de ensayo.....	82
9.1. Proceso de soldadura TIG con material base AISI 316L y metal de aporte ER 316L.....	82
9.2. Ensayo de tracción realizado para las probetas con material base AISI 316L y metal de aporte ER 316L	88
9.2.1. Tensión de rotura, Alargamiento en % y Módulo de Elasticidad.....	89
9.3. Corrosión por picaduras – Pitting.....	95
9.3.1. Metodología del ensayo de resistencia a la corrosión por picaduras.....	97
9.3.2. Metodología del ensayo de corrosión por pérdida de peso	98
10. Soldadura de acero inoxidable AISI 316L con varilla de aporte ER 316L.....	99

10.1. Resultados del ensayo de tracción.....	99
10.2. Resultados del ensayo de resistencia a la corrosión por picaduras (Pitting).....	105
10.3. Resultados del ensayo de corrosión por pérdida de peso	106
11. Conclusiones soldadura acero inoxidable AISI 316L con material de aporte ER 316L, frente a corrosión bajo tensión	108

Capítulo 2 Pliego de Condiciones..... 110

12. Condiciones del puesto de trabajo	110
12.1. Lugares de trabajo	110
12.2. Condiciones constructivas.....	110
12.3. Orden, limpieza y mantenimiento. Señalización.....	111
12.4. Instalaciones de servicio y protección.....	111
12.5. Condiciones ambientales.....	111
12.6. Iluminación	111
12.7. Ergonomía del puesto de trabajo	111
12.8. Ruido.....	111
12.9. Material y locales de primeros auxilios.....	112
13. Condiciones de los recursos materiales	112
13.1. Soldadura TIG de chapas de acero inoxidable AISI 316L con varilla de aporte ER316L.....	112
13.2. Obtención de probetas por corte de chapas soldadas de acero inoxidable AISI 316L con varilla de aporte ER 316L.....	113
13.3. Ensayo de tracción de las probetas soldadas de acero inoxidable AISI 316L con varilla de aporte ER 316L	113
13.4. Ensayo de corrosión de las probetas soldadas de acero inoxidable AISI 316L con varilla de aporte ER 316L	114
14. Condiciones de los recursos informáticos	114
14.1. Condiciones del hardware	114
14.1.1. Equipo portátil: Asus K55VM-SX077V	115
14.1.2. Equipo de sobremesa: Dell Inspiron Desktop	115
14.2. Condiciones del software	115

15. Normativa aplicada.....	115
-----------------------------	-----

Capitulo 3 Presupuesto 117

16. Coste de materiales.....	117
------------------------------	-----

17. Coste de mano de obra	118
---------------------------------	-----

18. Coste de medios auxiliares	119
--------------------------------------	-----

19. Presupuesto final	119
-----------------------------	-----

Índice Figuras

3.1. Relación entre el contenido de cromo-níquel de los distintos tipos de aceros inoxidable. [5].....	11
3.2. Celdas cristalinas BCC, FCC y BCT. [5]	12
3.3. Microestructura del acero al carbono, cristales blancos de Ferrita. [5]	13
3.4. Microestructura de la Austenita. [5]	14
3.5. Microestructura del acero 1% C, red blanca de Cementita. [5]	14
3.6. Microestructura de la Perlita, Ferrita en blanco. [5]	15
3.7. Microestructura de la Martensita. [5]	16
3.8. Diagrama fases cromo-hierro. [5].....	16
3.9. Influencia del carbono en la expansión del bucle gamma. [5].....	17
4.1. Esquema de una celda electroquímica. [6]	19
4.2. Serie galvánica para algunos metales y aleaciones comunes. [6].....	19
5.1. Posición de avance a derecha. [7].....	24
5.2. Posición de avance a izquierda. [7]	24
5.3. Posición de avance en vertical. [7]	25
5.4. Posición de avance en cornisa. [7].....	25
5.5. Posición de avance en techo. [7]	26
5.6. Junta para soldaduras a tope de chapas. [9].....	27
5.7. Junta en V para chapas y placas. [9].....	28
5.8. Junta doble en V para placas. [9].....	28
5.9. Junta en U para placas. [9].....	28
5.10. Junta doble en U para placas. [9].....	29
5.11. Junta para caños con inserto consumible. [9]	29
5.12. Junta para caños sin inserto consumible. [9]	29
5.13. Secuencia de puntadas adecuado. [9]	30
5.14. Puntadas realizadas desde un solo lado, con la consecuencia de deformaciones y desalineados. [9].....	31

5.15. Diseño de ranuras en barras de respaldo. (A) Ranura estándar para uso sin gas de respaldo. (B) Ranura cuadrada empleada con gas de respaldo. [9].....	31
5.16. Esquema de la soldadura por arco manual con electrodo revestido (SMAW). [10].....	35
5.17. Esquema del proceso en la soldadura TIG. [12].....	40
5.18. Relación intensidad-tiempo en la soldadura TIG por pulsos. [15]	41
5.19. Influencia de la forma del afilado en la calidad de la soldadura. [13]	44
5.20. Características en la soldadura en función del tipo de corriente y polaridad. [14]	45
5.21. Conjunto de elementos que componen un equipo de soldadura TIG. [15].....	46
5.22. Diferentes tipos de portaelectrodos o antorchas en la soldadura TIG. [15].....	46
5.23. Ilustración esquemática de portaelectrodo para la soldadura con plasma. [15].....	48
5.24. Principio del proceso de la soldadura (GMAW). [17].....	49
5.25. Influencia de la polaridad en la penetración de la soldadura (GMAW). [18].....	50
5.26. Tipos de cordones y penetraciones en función del gas empleado. [11].....	50
5.27. Esquema de los elementos que conforman un equipo de soldadura (GMAW). [19].....	57
5.28. Diferentes tipos de pistolas empleadas en la soldadura (GMAW). [20].....	58
5.29. Defectos y causas en la operatoria de la soldadura GMAW. [11]	59-60
6.1. Distintas zonas afectadas por el proceso de soldadura. [11].....	63
6.2. Diagrama esquemático de la zona afectada térmicamente y las sub-zonas derivadas indicadas sobre un diagrama Fe-Fe ₃ C. [11].....	64
6.3. Curvas TTS de sensibilización a la corrosión intergranular de los aceros inoxidables AISI 304 Y AISI 316. [11].....	67
6.4. Diagrama de fases para el sistema Fe-Cr-Ni. [11].....	68
7.1. Diagrama de Schaeffler. [5].....	74
7.2. Diagrama DeLong para aceros inoxidables soldados. [5].....	75
7.3. Zonas críticas del diagrama de Schaeffler. [5]	76
7.4. Ejemplo diagrama de Schaeffler. [5].....	77
8.1. Influencia de los rayos en el ojo humano. [5].....	79
8.2. Escala de cristal inactínico en función del proceso de soldadura. [5].....	79
9.1. Equipo de soldadura TIG de la marca Fronius, modelo Transtig 1700.	83
9.2. Chapas de acero inoxidable 200x100x1.5 mm AISI 316L.	83
9.3. Composición química de los aceros inoxidables austeníticos. [5].....	84

9.4. Composición química del metal de aporte con varilla ER316L. [5].....	85
9.5. Bancada con tornillo de banco y radial, para la retirada de material sobrante y pulido.	86
9.6. Cizalladora empleada en el corte de las probetas.	87
9.7. Proceso de corte de chapas para obtención de probetas.	87
9.8. Probetas de acero inoxidable AISI 316L + ER 316L.	88
9.9. Máquina de ensayo de tracción marca Ibertest y equipo informático.....	89
9.10. Diagrama esquemático tensión-deformación en el ensayo de tracción de un acero. [23].....	90
9.11. Diagrama esquemático tensión-deformación en el ensayo de tracción de materiales frágiles y dúctiles. [21].....	93
9.12. Definición del módulo de elasticidad mediante diagrama tensión-deformación. [22]	94
9.13. Vitrina de gases de la marca Flores Valles.	98
9.14. Balanza de precisión KERN 770.	98
10.1. Probetas de acero inoxidable AISI 316L + ER 316L, ensayadas a tracción hasta alcanzar la rotura, para cada uno de grupos de ensayo.	99
10.2. Curva tensión-deformación ensayo de tracción hasta la rotura probeta M1.....	100
10.3. Curva tensión-deformación ensayo de tracción hasta la rotura probeta M2.....	100
10.4. Curva tensión-deformación ensayo de tracción hasta la rotura probeta M3.....	101
10.5. Curva tensión-deformación ensayo de tracción hasta la rotura probeta M4.....	101
10.6. Curva tensión-deformación ensayo de tracción Grupo 1 F = 11,2 kN.	102
10.7. Curva tensión-deformación ensayo de tracción Grupo 2 F = 12,2 kN.	103
10.8. Curva tensión-deformación ensayo de tracción Grupo 3 F = 13 kN.	103
10.9. Curva tensión-deformación ensayo de tracción Grupo 4 F = 14 kN.	104
10.10. Probetas de acero inoxidable AISI 316L + ER 316L, sometidas a tracción axial y a corrosión bajo tensión en una disolución de Cloruro Férrico al 20%.....	105
10.11. Curva nº picaduras-tensión, en la corrosión húmeda localizada por picaduras (Pitting)..	106
10.12. Curva de pérdida de peso-tensión, en la corrosión bajo tensión del AISI 316L + ER 316L. ..	107
11.1. Silo de acero inoxidable con una capacidad de 120 Toneladas.	109

Índice Tablas

3.1. Correspondencia entre designaciones en varias normativas. [3]	4
3.2. Comparativa de los aceros inoxidable. [4].....	10
5.1. Métodos de corte del acero inoxidable. [7]	27
5.2. Comparación empleo corriente alterna y corriente continua. [11].....	39
5.3. Energías de disociación e ionización de algunos gases. [11].....	41
5.4. Principales ventajas y limitaciones en la soldadura TIG. [11].....	47
5.5. Cuadro analogías y diferencias entre PAW y TIG (GTAW). [11]	48
5.6. Principales ventajas y limitaciones en la soldadura GTAW. [11]	58
10.1. Cuadro resumen propiedades mecánicas soldadura AISI 316L + ER 316L, a partir del ensayo de tracción hasta la rotura, para las muestras M1, M2, M3 y M4.	102
10.2. Características mecánicas obtenidas del ensayo de tracción sin rotura de las probetas de acero inoxidable AISI 316L + ER 316L.	104
10.3. Nº de picaduras por grupo ensayado.....	105
10.4. Resultados de peso inicial, final y pérdida de peso de las probetas ensayadas.....	107

Capítulo 1

Memoria Descriptiva

1. Objetivos

El objetivo que se pretenden alcanzar en este proyecto, es el análisis del comportamiento de los aceros inoxidable a nivel corrosivo, en función de distintos estados tensionales y más concretamente, los relacionados con los esfuerzos de tracción, dentro del ámbito de la soldadura de acero inoxidable. Siendo que en la industria de ciertos sectores, como el alimentario, farmacéutico, cervecero, petroquímico, etc., existen estructuras las cuales se ven sometidas a este tipo de esfuerzo de tracción, relacionados con su ciclo de funcionamiento y muchos otros esfuerzos, los cuales no se analizarán en este proyecto, por centrarse concretamente en los esfuerzos de tracción.

De todos los aceros inoxidables existentes en el mercado, ha sido empleado para el presente proyecto el Acero Inoxidable AISI 316L, como el material base para la realización de las soldaduras en la probetas (pletinas de acero inoxidable) y utilizando como material de aporte para la soldadura el ER 316L. Donde el proceso de soldadura empleado será el TIG (Tungsten Inert Gas), el cual mantiene la soldadura bajo una atmosfera de gas inerte, que habitualmente es de gas Argón.

Las características mecánicas de las probetas soldadas, se evaluarán a través de ensayos de tracción, donde se determinarán las curvas de tensión-deformación de las probetas soldadas, las correlaciones de número de picaduras-tensión y pérdida de peso-tensión, después de haber sido expuestas las probetas a un ambiente corrosivo.

2. Antecedentes

Los primeros pasos que se realizaron en el acero inoxidable, fueron realizados por Harry Brearley, nacido en Sheffield, Inglaterra, en 1871, probablemente él fue el inventor del acero inoxidable. Su padre era fundidor de acero y mediante estudios privados y escuela nocturna, se volvió un experto en acero y en su producción. En 1908 le dieron la oportunidad de montar los laboratorios Brown Firth, financiados por las dos acerías principales de Sheffield de aquella época. En 1912 se le pidió resolver los problemas encontrados por un pequeño fabricante de armas, según el cual, los diámetros internos de los barriles de sus rifles se erosionaban demasiado rápido, debido al calor y los gases de descarga.

Como parte de su investigación, decidió experimentar con un acero que contenía cromo, pues era conocido por tener un punto de fusión más alto que los aceros ordinarios. Se

realizaron una serie de coladas con entre 6% y 15% de cromo y contenidos de carbono variables. El primer acero realmente inoxidable fue fundido el 13 de Agosto de 1913, contenía 0.24% de carbono y 12.8% de cromo. En este momento Brearley seguía buscando un acero más resistente al desgaste y, para examinar la estructura de los granos del acero necesitaba grabar las muestras antes de examinarlas bajo el microscopio. En esa época los cubiertos eran de plata o de níquel plateado y los cuchillos de acero debían ser rápidamente lavados y secados.

Brearley se dio cuenta de cómo este nuevo acero podía revolucionar la industria de los cubiertos y por cuenta propia, hizo sus propios cuchillos con el cuchillero local, R.F. Mosley. Al principio, Brearley se refería a su invención como “acero antiherrumbre”. Fue Ernest Stuart, el mánager del cuchillero el que se refirió por primera vez a los cuchillos como de “acero inoxidable”.

Otra reclamación sobre la invención del acero inoxidable, se basa en un artículo de 1913 de una revista sueca de caza y pesca, sobre un acero que fue usado, otra vez, para barriles de rifle. El acero se asemeja al acero inoxidable, así que parece ser que la primera colada comercial puede haber sido producida en Suecia.

Según aportes Alemanes, un año después del descubrimiento de Brearley, Krupp en Alemania experimentaba agregando níquel a la mezcla. El acero de Brearley solo podía ser suministrado endurecido y enfriado, el acero de Krupp era más resistente a los ácidos, más suave y más dúctil, siendo más fácil para ser trabajado. No hay duda que para el descubrimiento casual de Brearley, los metalúrgicos de Krupp hubieran hecho el descubrimiento por su cuenta.

De esas dos invenciones, justo antes de la Primera Guerra Mundial, fueron desarrolladas las series “400” y “300” de acero inoxidable martensítico y austenítico, respectivamente. La Primera Guerra Mundial detuvo el desarrollo del acero inoxidable, pero a inicio de los años 20, una gran variedad de combinaciones de cromo y níquel fueron probadas, incluyendo 20/6, 17/7 y 15/11. El sucesor de Brearley en los laboratorios Brown Firth fue el Dr. W.H. Hatfield, al que se le atribuye la creación del acero inoxidable 18/8 en 1924 (18% cromo, 8% níquel). Hoy en día, el 18/8 es comúnmente conocido como 304. El Dr. Hatfield también inventó el acero 18/8 con titanio incluido, conocido ahora como 321.

La mayoría de los grados estándar que seguimos usando hoy en día fueron inventados en el periodo 1913-1935 en Inglaterra, Alemania, Estados Unidos y Francia. Después de la Segunda Guerra Mundial, se empezaron a desarrollar nuevos grados con una mejor relación peso/resistencia, siendo requeridos estos para la aviación de reacción a chorro, en desarrollo en dicha época.

3. Acero inoxidable y tipos

3.1. Acero inoxidable

El acero inoxidable es una aleación de hierro y carbono que contiene por definición un mínimo de 12% de cromo. Algunos tipos de acero inoxidable contienen además otros elementos aleantes como son el níquel y el molibdeno, siendo estos dos últimos de los principales. Es un tipo de acero resistente a la corrosión, el cromo que contiene posee gran afinidad por el oxígeno y reacciona con él formando una capa pasivadora que evita la corrosión del hierro contenido en la aleación.

Sin embargo, esta película puede ser afectada por algunos ácidos dando lugar a un ataque y oxidación del hierro por mecanismos intergranulares o picaduras generalizadas.

3.2. Tipos de aleaciones de acero inoxidable

La familia de aleaciones de acero inoxidable según su estructura metalúrgica, está conformada principalmente por cinco grupos, en los que podemos encontrar: austeníticos, ferríticos, martensíticos, dúplex y de precipitación-endurecimiento. La designación de los aceros inoxidables empleada es la del sistema AISI, que utiliza un código de tres dígitos a veces seguido de una o más letras. El primer dígito hace referencia a la clase de acero, siendo las series 2xx y 3xx, correspondiente a un acero austenítico.

La serie 4xx es para los aceros ferríticos y martensíticos. El segundo y tercer dígito no están relacionados a la composición del material, ni tampoco sigue una secuencia ordenada (los aceros 430 y 446 son ferríticos, mientras que los aceros 431 y 440 son martensíticos). Las letras de sufijo pueden indicar la presencia un elemento adicional. En la tabla 3.1 se representa la correspondencia entre designaciones de los aceros inoxidables según varias normativas.

EN (10088)	Anglaterra BSI	Estados Unidos		Alemania DIN	Suecia SIS	EN (10283)	Francia AFNOR	Composición guía				
		AISI	UNS					C	Cr	Ni	Mo	Others
1.4005	416S21	416	-	X12CrS13	-	-	Z 11 CF 13					
1.4006	410S21	410	-	X10Cr13	-	-	Z 10 C 13					
1.4016	430S17	430	-	X6Cr17	-	-	Z 8 C 17					
1.4021	420S37	420	-	X20Cr13	-	-	Z 20 C 13					
1.4301	304S31	304	S30400	X5CrNi18-10	2333	1.4308	Z 6 CN 18-09	0.07x	18	8	-	-
1.4303	305S19	305	S30500	X5CrNi18-12	-	-		0.06x	18	11	-	-
1.4305	303S31	303	S30300	X10CrNiS18-9	2346	-	-	0.10x	18	8	-	0.35xS
1.4306	-	304L	-	X2CrNi19-11	2352	-	Z 2 CN 18-10	0.030x	18	10	-	-
1.4307	304S11	304L	S30403	-	2352	-		0.030x	18	8	-	-
1.4310	301S21	301	S30100	X12CrNi17-7	2331	-		0.05/15	17	6	-	-
1.4311	304S61	304LN	S30453	X2CrNi18-10	2371	1.4309	Z 2 CN 18-10 Az	0.030x	18	9	-	0.22xN
1.4372	-	201	S20100	-	-	-		0.15x	17	4.5	-	6.5Mn
1.4401	316S31	316	S31600	X5CrNiMo17-12-2	2347	-	Z 6 CND 17-11	0.07x	17	11	2	-
1.4404	316S11	316L	S31603	X2CrNiMo17-13-2	2348	1.4408	Z 2 CND 17-12	0.030x	17	11	2	-
1.4406	316S61	316LN	S31653	X2CrNiMo17-12-2	-	1.4409	Z 2 CND 17-12 Az	0.030x	17	11	2	0.22xN
1.4432	316S13	316L	-	-	2353	-		0.030x	17	11	2.5	-
1.4435	316S13	316L	-	XCrNiMo18-14-3	2353	-	Z 2 CND 17-13	0.030x	17	13	2.5	-
1.4436	316S33	316	-	X5CrNiMo17-13-3	2343	-	-	0.05	17	11	2.5	-
1.4438	317S12	317L	S31703	-	2367	-		0.030x	18	13	3	-
1.4439	-	-	-	X2CrNiMo17-13-5	-	1.4446		0.030x	17	13	4	0.22xN
1.4462	Duplex 2205	-	S31803	X2CrNiMoN22-5-3	-	-	Z 2 CND 22-5 Az	0.030x	22	5	2.5	0.22xN
1.4541	321S31	321	S32100	X6CrNiTi18-10	2337	-	Z 6 CNT 18-10	0.08x	18	9	-	0.5Ti
1.4550	347S31	347	S34700	X6CrNiNb18-10	2338	1.4552		0.08x	18	9	-	0.5Nb
1.4563	-	-	N08028	X1NiCrMoCu31-27-4	2584	-		0.02x	26	30	3.0	1.0Cu
1.4567	394S17	304Cu	S30430	-	-	-		0.04x	18	9	-	4xCu
1.4571	320S31	(316Ti)	S31635	X6CrNiMoTi17-12-2	2350	1.4581	Z 6 CNDT 17-12	0.08x	17	11	2	0.5Ti
1.4539	904S13	-	N08904	X1CrNiMoCuN25-20-5	2562	1.4584	Z 1 CNDU 25-20	0.020x	19	24	4	1.5Cu
1.4547	-	-	S31254	-	2378	1.4593		0.020x	20	18	6	0.75Cu
1.4529	-	-	N08925	X1NiCrMoCuN25-20-6	-	1.4588		0.020x	19	24	6	1.25Cu

Tabla 3.1: Correspondencia entre designaciones en varias normativas. [3]

3.2.1. Aceros inoxidables martensíticos

Los aceros inoxidables martensíticos son uno de los aceros de primera rama, con la adición del cromo. Son los primeros que se desarrollaron industrialmente y representan una parte de la serie 400 AISI (American Iron & Steel Institute). Los valores de cromo (Cr) están entre el 10.5% a 18%, siendo el carbono (C) hasta 1.2%. La relación cromo-carbono esta balanceada para formar la estructura martensítica durante el tratamiento térmico. Sus principales características son:

- Moderada resistencia a la corrosión.
- Son endurecibles por medio de tratamientos térmicos y en consecuencia se pueden obtener altos niveles de resistencia mecánica y dureza.
- Son magnéticos.
- Son de baja soldabilidad debido a la alta dureza y alto contenido de carbono.

Este grupo se divide en:

AISI 403: Es empleado en las partes críticas de maquinaria que está sometida a altos esfuerzos, además de buena resistencia al calor, corrosión, desgaste abrasivo o erosión.

AISI 410: Tiene buena ductilidad y es fácilmente soldable. No es recomendado para condiciones muy severas de corrosión y ofrece muy buena resistencia a temperaturas por debajo de los 650°C. Es empleado en aplicaciones como, cuchillería, tijeras, válvulas, maquinaria para minería, componentes para turbinas de vapor, etc.

AISI 416: Tiene una muy buena maquinabilidad, cuando a este se le añade Selenio, haciendo que sea muy recomendable para la fabricación de piezas en máquinas automáticas. Destaca también por sus buenas propiedades de ductilidad, soldabilidad y trabajo en frío, teniendo una buena resistencia a la corrosión para temperaturas inferiores a 650°C. Es empleado para la fabricación de tornillos, espárragos, tuercas, cerraduras, cabezas de palos de golf, etc.

AISI 420: Es una variante del 410, pero con alto contenido de carbono, consiguiendo así una mayor dureza y resistencia al desgaste, en detrimento de una mayor resistencia a la corrosión. Es empleado en los instrumentos dentales y quirúrgicos, moldes, herramientas, etc.

AISI 422: Es un acero empleado para el servicio a temperaturas de hasta 650°C, que combina una buena resistencia mecánica. Tiene una maquinabilidad de mediana a baja.

AISI 431: Es un acero al someterse a tratamiento térmico mejora sustancialmente sus propiedades mecánicas, consiguiendo una muy buena ductilidad, resistencia al impacto y buena resistencia a la corrosión, mejorando las propiedades del tipo 410. Sus aplicaciones pueden ser para flechas para barcos y uso industrial, tensores y partes para la industria aeronáutica, etc.

AISI 440: Este acero es empleado cuando se requiere de unas características de muy alta dureza, resistencia a la abrasión y buena resistencia a la corrosión. Tiene una baja maquinabilidad y es utilizado en aplicaciones como, cuchillería, inyectores, etc.

3.2.2. Aceros inoxidables ferríticos

Los aceros inoxidables ferríticos mantienen su estructura ferrítica estable desde la temperatura ambiente hasta el punto de fusión. Su contenido en cromo (Cr) es de 10.5% a 30% y su contenido de carbono (C) oscila alrededor del 0.08%, pudiendo contener otros elementos aleantes como molibdeno, silicio, aluminio, titanio y niobio. Algunas de sus principales características son:

- Resistencia a la corrosión de moderada a buena, pudiéndose mejorar incrementando el contenido de cromo y en algunas aleaciones de molibdeno.
- Al ser trabajados en frío adquieren un endurecimiento moderado y no pueden ser endurecidos por tratamiento térmico.
- Las aleaciones ferríticas son magnéticas.
- Su soldabilidad es mínima.
- Normalmente para obtener una mayor suavidad, ductilidad y resistencia a la corrosión, se les aplica un tratamiento de recocido.

Este grupo se divide en:

AISI 405: Es conocido como un grado soldable del tipo 410 y suele ser empleado en partes resistentes al calor, equipos para refinación de calor, etc.

AISI 409: Es un acero estructural de uso general, donde es empleado para fabricar silenciadores, convertidores catalíticos para automóviles, cajas de tráiler, etc.

AISI 430: Soldable con una muy buena ductilidad, recomendable cuando sea necesario disponer de una aleación que sea fácil de trabajar y que se moldee a las formas deseadas de doblado, troquelado o estirado. Buena resistencia a la corrosión a temperaturas de hasta 760°C. Algunas de las aplicaciones donde es empleado son, molduras para automóviles, acabados arquitectónicos, máquinas procesadoras de tabaco, etc.

AISI 434: Es una variante del tipo 430, conteniendo molibdeno y niobio, los cuales incrementan la resistencia a la corrosión.

AISI 446: De todo el grupo de aleaciones ferríticas es que mayor contenido de cromo tiene, proporcionándole la mayor resistencia de su clase, donde se recomienda para el uso en atmósferas de alto contenido en azufre y altas temperaturas 1.000°C. No debe ser empleado en aplicaciones donde se requiera de una alta resistencia mecánica. Es empleado en la fabricación de bases para tubos de rayos X, partes de quemadores, etc.

3.2.3. Aceros inoxidable austeníticos

Los aceros inoxidable austeníticos conforman las series 200 y 300 AISI (American Iron & Steel Institute). Tienen una excelente formabilidad y una muy buena resistencia a la corrosión. El contenido de cromo (Cr) está entre 16% al 26% y su contenido de carbono (C) entre 0.03% al 0.08%. La obtención de estos aceros se obtienen adicionando elementos formadores de austenita, tales como níquel, manganeso y nitrógeno. Sus características son las siguientes:

- Buena resistencia a la corrosión.
- Adquieren endurecimiento por medio de trabajo en frío y no por tratamiento térmico.
- Excelente soldabilidad.
- Formado sencillo y de fácil transformación.
- Son funcionales en temperaturas extremas, altas temperaturas hasta 925°C y a bajas temperaturas previenen la fragilización.
- No magnéticos. Después de haber sido tratados en frío pueden ser magnéticos, siendo el grado de magnetismo función del tipo de aleación.

La serie 300 AISI es más extensa, mantiene alto contenido de níquel y hasta el 2% de manganeso. Para conferir ciertas características, también puede contener molibdeno, cobre, silicio, aluminio, titanio y niobio. Para mejorar la maquinabilidad en ciertos tipos se emplea azufre o selenio.

La serie 200 AISI contiene una menor cantidad de níquel, siendo el contenido de manganeso entre 5% y el 20%, donde la adición de nitrógeno incrementa la resistencia mecánica.

Este grupo se divide en:

AISI 201: Es conocido por ser el sustituto del acero 304, pero con valores de níquel más bajos. El porcentaje de níquel es del 1% al 4%, siendo compensado este nivel más bajo de níquel, con la contribución de otros elementos como, carbono, manganeso, cobre y nitrógeno. Es utilizado normalmente en aparatos domésticos, ornamentales, escaleras, muebles o aplicaciones de uso estructural con exposición limitada a la corrosión.

AISI 202: Al igual que el acero AISI 201, es conocido también como un sustituto del acero 304, pero con un porcentaje de níquel mayor. El porcentaje de níquel es del 4% al 6%. Es utilizado en aparatos domésticos, ornamentales, escaleras, ganchos y otras aplicaciones con exposición limitada a la corrosión.

AISI 203: Acero una muy buena maquinabilidad, diseñado especialmente para operaciones en máquinas de alta velocidad, mejores acabados, una mayor vida útil de la herramienta en comparación con el acero 303.

AISI 301: Puede ser fácilmente formado y con buenas propiedades de soldabilidad, siendo su resistencia a la corrosión menor a la de otros aceros de la serie 300. Utilizado

en partes de aviones, adornos arquitectónicos, cajas de ferrocarril y de tráiler, equipos para procesamiento de alimentos, etc.

AISI 303: Tiene una excelente maquinabilidad que lo hace ideal para la fabricación de piezas en máquinas automáticas. Buena resistencia a la corrosión cuando está expuesto a la atmósfera ordinaria, hasta temperaturas de 920°C, también a soluciones esterilizadas, la mayoría de los químicos orgánicos y muchos inorgánicos, tintes y pinturas, ácido nítrico y comida.

AISI 304: Tiene muy buenas propiedades de ductilidad y maleabilidad, siendo su resistencia a la corrosión buena a temperaturas de hasta 920°C en servicio continuo y de 870°C en servicio intermitente. Debido a su bajo contenido en carbono, resulta recomendable para los procesos de soldadura. Algunas aplicaciones donde es utilizado son, evaporadores, barriles de cerveza, tanques de oxígeno líquido, etc.

AISI 304L: Esta variación del acero 304 es de bajo carbono y evita daños en la inclusión de partículas o residuos de metal con carbón debido a la soldadura. Su resistencia a la corrosión es la misma que el acero 304 y con propiedades mecánicas un poco inferiores que este último. Algunas de sus aplicaciones son, recubrimiento para tolvas de carbón, tanques de pulverización de fertilizantes líquidos, tanques de almacenamiento de pasta de tomate, etc.

AISI 309: Tienen una alta tenacidad, resistencia mecánica y una muy buena resistencia a la oxidación hasta temperaturas de 1.000°C. Este acero es empleado para calentadores de aire, quemadores de turbina de gas, intercambiadores de calor, etc.

AISI 310: Estos poseen un mayor contenido en níquel y cromo, lo que les confiere una gran resistencia a la corrosión hasta temperaturas de 1.100°C, con lo que es recomendable para servicios intermitentes. Empleado para intercambiadores de calor, incineradoras, hornos industriales, etc.

AISI 316: Tiene buenas propiedades de soldabilidad y ductilidad, siendo la adición de molibdeno lo que le proporciona una mayor resistencia a la corrosión que las demás aleaciones, bajo condiciones de corrosión ácida y temperaturas hasta los 870°C. Sus aplicaciones son, adornos arquitectónicos, equipos para el procesamiento de alimentos, farmacéutico, fotográfico, textil, etc.

AISI 316L: Este acero tiene un porcentaje de carbono inferior al acero 316, el cual evita daños por la inclusión de partículas o residuos de metal con carbón debido a la soldadura, evita la SCC (Stress Corrosion Cracking). Su aplicación se realiza en equipos de las industrias químicas, farmacéuticas, textiles, petroleros, papel, celulosa, tanques, agitadores, condensadores, piezas expuestas al ambiente marino, etc.

AISI 321: Tiene una excelente resistencia a la corrosión extrema en los procesos de soldadura y trabajo hasta 920°C de temperatura, debido a la adición del titanio. Normalmente es empleado para equipos donde no es posible realizar un recocido o donde se trabaja con un rango de temperaturas es de 430°C hasta 820°C y después es

aplicado un enfriamiento lento. Sus aplicaciones son sistemas de escape para aviones, tanques sometidos a soldadura, partes de motores jet, etc.

3.2.4. Aceros inoxidables dúplex

Los aceros inoxidables dúplex están formados por una aleación de cromo, níquel y molibdeno, formando aproximadamente una mezcla de cantidades iguales de austenita y ferrita. El contenido de cromo (Cr) está entre el 18% y el 26% y su contenido de níquel (Ni) entre el 4.5% y el 6.5%. Otros elementos que pueden ser adicionados son, el nitrógeno, molibdeno, cobre, silicio y tungsteno. Tienen mejor tenacidad y ductilidad que los ferríticos, pero sin alcanzar a los valores de los austeníticos. El acero dúplex tipo 2205 es resistente a los ácidos reductores diluidos y a moderadas concentraciones de ácidos oxidantes, con lo que, tiene una resistencia a la corrosión por picadura superior a al acero inoxidable tipo 316. Sus características son las siguientes:

- Son magnéticos.
- No endurecibles por tratamiento térmico.
- Buena soldabilidad y conformabilidad.
- Mejora la resistencia a la corrosión de fractura bajo tensión, en ambientes con iones de cloruro.

3.2.5. Aceros inoxidables endurecibles por precipitación

Son aleaciones base hierro, donde el contenido de cromo (Cr) es del 12% al 18%, y el contenido de níquel (Ni) es del 4% al 9%. Algunos de los elementos aleantes que son empleados en el endurecimiento por precipitación son, molibdeno (Mo), titanio (Ti), nitrógeno (N), cobre (Cu), aluminio (Al), tantalio (Ta), niobio (Nb) y vanadio (V). Estos elementos aleantes son los responsables de la formación de compuestos intermetálicos de forma controlada.

El endurecimiento de estos aceros es posible a través de la precipitación desde una matriz martensítica, donde el acero es sometido a un tratamiento térmico de solubilización, alcanzando temperaturas de 1.050°C con un posterior enfriamiento al aire, con lo que se obtiene una matriz martensítica sobresaturada. Después el acero es envejecido a una temperatura entre 455°C y 565°C, para que se produzcan los precipitados de los compuestos intermetálicos endurecedores.

Dicho endurecimiento solo es obtenido cuando se consiguen precipitados en el interior de los granos, distribuidos homogéneamente evitando el deslizamiento de las dislocaciones.

Características de los aceros inoxidable endurecibles por precipitación:

- Buena resistencia a la corrosión a temperatura ambiente y elevada.
- Alta resistencia a la tracción en caliente.
- Alta dureza, resistencia mecánica y límite de elasticidad a temperatura ambiente.
- Límite elástico entre 515 y 1.415 MPa.
- Resistencia mecánica entre 860 y 1.520 MPa.
- Mayores propiedades mecánicas cuando primeramente son trabajados en frío y después tratados con un tratamiento térmico de envejecimiento.

Algunos grados tipos son el acero inoxidable 17-4PH (630) y el 15-5PH. Son empleados para la fabricación de álabes de turbinas, piezas de motores de aviación, fabricación de engranajes, etc.

A continuación se indica en la tabla 3.2 una comparativa de los aceros inoxidable, en función de sus características:

	Austenítico	Ferrítico	Martensítico	Endurecido por precipitación	Duplex
Resistencia a la corrosión	Alta	Media	Media	Media	Muy alta
Respuesta magnética	Generalmente no	Sí	Sí	Sí	Sí
Soldabilidad	Muy alta	Baja	Baja	Alta	Alta
Resistencia a altas temperaturas	Muy alta	Alta	Baja	Baja	Baja
Resistencia a bajas temperaturas	Muy alta	Baja	Baja	Baja	Media
Ductilidad	Muy alta	Media	Baja	Media	Media
Ritmo de endurecimiento	Muy alto	Medio	Medio	Medio	Medio
Endurecible	En frío	No	Por templado y enfriado	Por envejecimiento	No

Tabla 3.2: Comparativa de los aceros inoxidable. [4]

En la figura 3.1 se indica una clasificación de los distintos tipos de aceros inoxidable utilizados habitualmente en la industria, como son las clases martensítica, ferrítica, austenítica, dúplex y endurecimiento por precipitación, por su contenido de cromo-níquel.

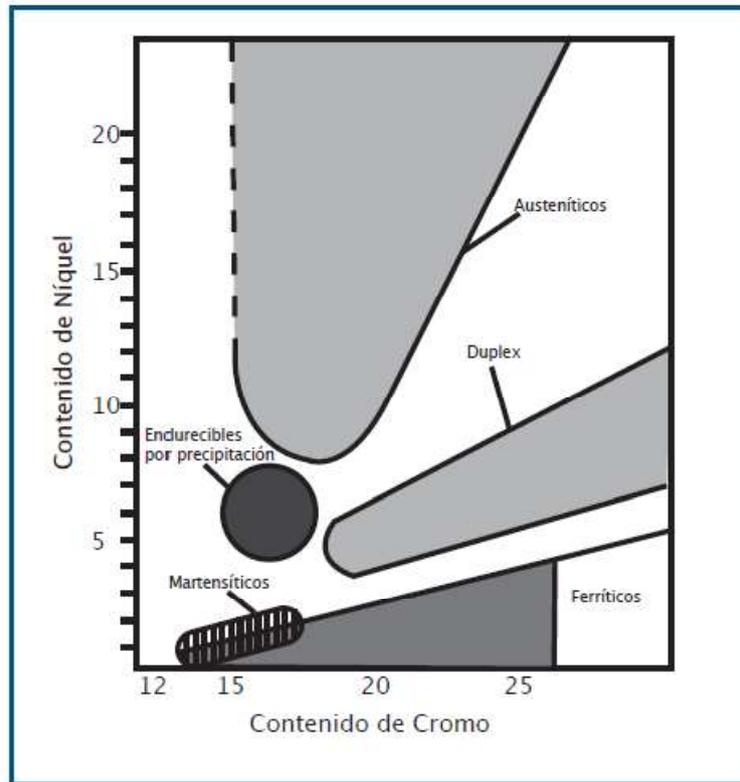


Figura 3.1: Relación entre el contenido de cromo-níquel de los distintos tipos de aceros inoxidables. [5]

3.3. FERRITA, AUSTENITA, MARTENSITA, CEMENTITA, PERLITA Y SOLUCIONES SÓLIDAS

3.3.1. Ferrita y Austenita

El hierro puro solidifica a una temperatura de 1536°C , en una forma cristalina denominada Ferrita, que tiene una estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC), constituida por un átomo en cada una de las esquinas y un átomo en su centro. Cuando se enfría a la temperatura de 1392°C la estructura pasa a transformarse en Austenita, que tiene una estructura cúbica centrada en las caras (FCC), constituida por un átomo en cada una de las ocho esquinas y un átomo en el centro de cada una de las caras. Luego a la temperatura de 911°C se vuelve a transformar en Ferrita. Aunque la Ferrita comparte la misma estructura a temperaturas baja que alta, su denominación es distinta, pasando a ser Ferrita delta (δ) para temperatura alta y Ferrita alpha (α) para temperatura baja. La Austenita es denominada por la letra gamma (γ). A continuación en la Figura 2.1 se representan los distintos tipos de estructura cristalina.

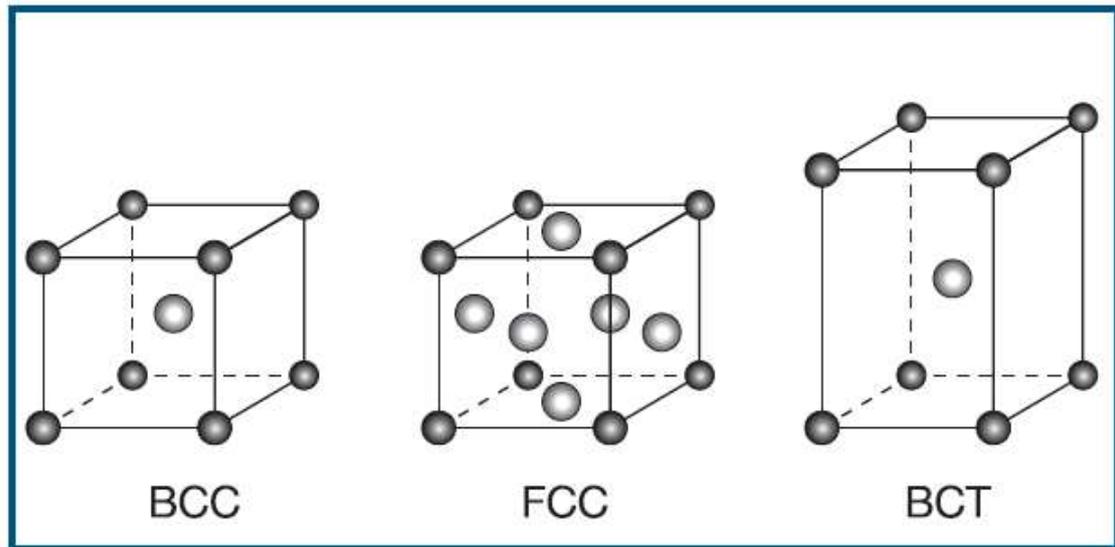


Figura 3.2: Celdas cristalinas BCC, FCC y BCT. [5]

Para la Martensita se corresponde una estructura tetragonal centrada en el cuerpo (BCT), similar a la estructura BCC, pero siendo uno de sus ejes más elongado. Ya que las estructuras martensíticas son duras y frágiles, se requiere de un tratamiento térmico posterior (revenido), para poder así reducir su dureza y resistencia, y aumentar su ductilidad.

3.3.2. Soluciones sólidas

Considerando una aleación de hierro con un 13% de cromo (Cr), donde los átomos de hierro (Fe) y cromo (Cr) son prácticamente del mismo tamaño y donde uno de cada siete átomos es de cromo (Cr). Esta distribución en la que los átomos del segundo elemento se distribuyen de forma uniforme en la estructura del cristal base, es conocida como sustitucional.

La solución sólida es conocida como sustitucional, al encontrarse los átomos en sitios prácticamente iguales a los átomos de hierro (Fe). Cuando se añade carbono (C) a la aleación, como estos tiene un tamaño menor que los átomos de hierro (Fe) y cromo (Cr), estos se distribuyen en los intersticios de los otros átomos, pasando a formar una solución sólida intersticial.

3.3.3. Propiedades de la Ferrita

Tiene una solubilidad a temperatura ambiente del orden de 0.008% de carbono, por lo que se considera como hierro puro. Su solubilidad máxima de carbono en el hierro alpha, es del 0.02% para una temperatura de 723°C. La ferrita es magnética y

tiene una estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo (BCC), siendo su dureza aproximadamente de 90 Brinell, resistencia a la tracción de 28 kg/mm^2 y un alargamiento entorno al 35%. Conjuntamente con la Cementita forma la Perlita. En la figura 2.2 se muestra la estructura cristalina de la ferrita.

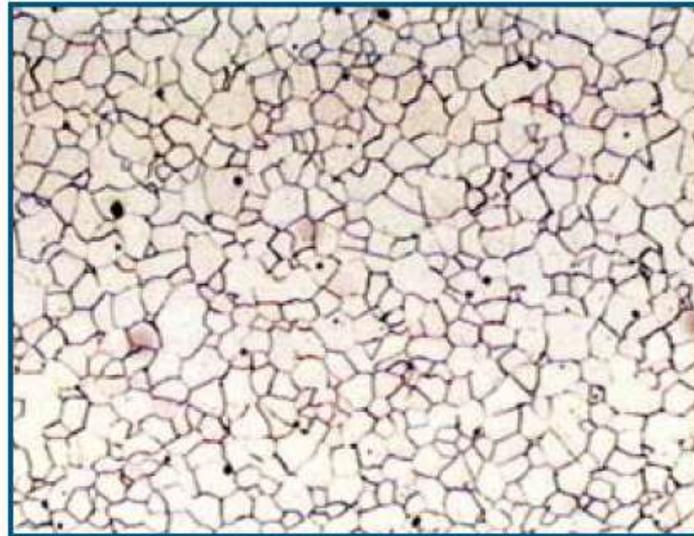


Figura 3.3: Microestructura del acero al carbono, cristales blancos de Ferrita. [5]

3.3.4. Propiedades de la Austenita

Está formada por una solución sólida de carbono en hierro gamma. Como propiedades resulta ser blanda, dúctil, tenaz y no magnética. Los granos tienen un contorno rectilíneo, donde la cantidad de carbono disuelto puede variar hasta el 2.05% de carbono (C), donde resulta que se alcanza la máxima solubilidad a la temperatura de 1130°C . Su estructura está formada por cristales cúbicos centrados en las caras (FCC). Su resistencia puede variar entre 590 MPa a 885 MPa. En la figura 2.3 se puede ver la microestructura que posee la Austenita.



Figura 3.4: Microestructura de la Austenita. [5]

3.3.5. Propiedades de la Cementita

La Cementita tiene un contenido de 6.67% de carbono (C) y un 93.33% de hierro (Fe). Es el más duro y frágil, alcanzando una dureza Brinell de 700. En los aceros cuyo contenido es superior al 0.9% de carbono (C), forma una red que termina envolviendo a los granos de Perlita como láminas paralelas, separadas por otras láminas de Ferrita. En los aceros hipoeutectoides cuando el tratamiento de temple no ha sido bien aplicado aparece Cementita. En la figura 2.4 se muestra la microestructura de la Cementita.

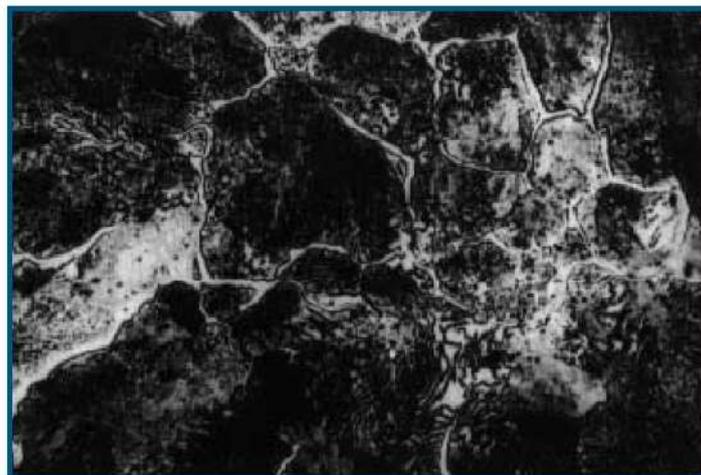


Figura 3.5: Microestructura del acero 1% C, red blanca de Cementita. [5]

3.3.6. Propiedades de la Perlita

La Perlita tiene un contenido del 0.8% de carbono (C), un 88% de Ferrita y 12% de Cementita, estando formada por capas que se alternan de Ferrita y Cementita. Su dureza es de 250 Brinell, resistencia a la tracción de 80 kg/mm^2 y un 15% de alargamiento. Su aparición es debida al enfriamiento lento de la Austenita y más específicamente por la transformación isotérmica de la Austenita para el rango de temperaturas de 650 a 723°C. En la figura 2.5 se muestra la microestructura de la Perlita.

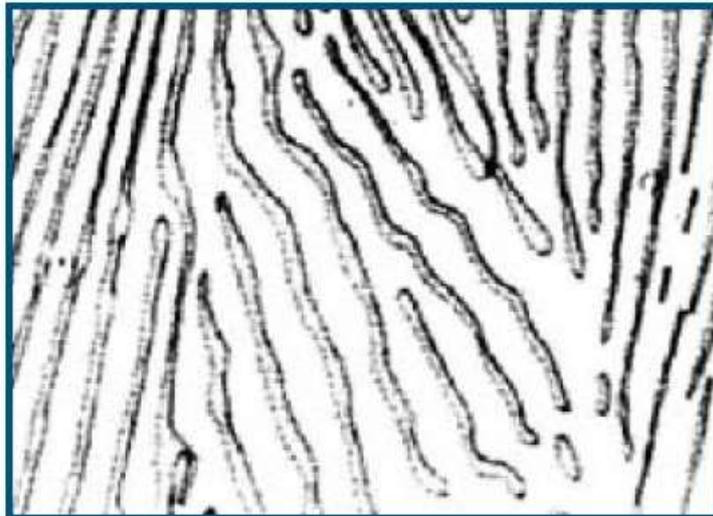


Figura 3.6: Microestructura de la Perlita, Ferrita en blanco. [5]

3.3.7. Propiedades de la Martensita.

Es una solución sólida sobresaturada de carbono en Ferrita, que se obtiene por medio de un enfriamiento rápido desde su punto austenítico a altas temperaturas. Su contenido de carbono varía entre muy poco y el 1%, teniendo una dureza de 495 a 745 Brinell, una resistencia a la tracción de 170 a 250 kg/mm^2 y un alargamiento entre el 0.5% y el 2.5%. Los aceros templados adquieren demasiada dureza y fragilidad, para lo que es necesario aplicar un revenido para disminuir estas propiedades en su favor.

Dicho revenido consiste en calentar el acero hasta una temperatura inferior a la crítica de 723°C, para posteriormente realizar un enfriamiento al aire. En la figura 2.6 se muestra como es la estructura de la Martensita.



Figura 3.7: Microestructura de la Martensita. [5]

3.4. Diagrama Cromo-Hierro

Una forma rápida de revisar los distintos tipos de aceros inoxidable, martensítico, ferrítico, austenítico, dúplex y endurecibles por precipitación, es mediante el análisis del diagrama de equilibrio estable cromo-hierro. En la figura 2.7 se muestra el diagrama de fases cromo-hierro.

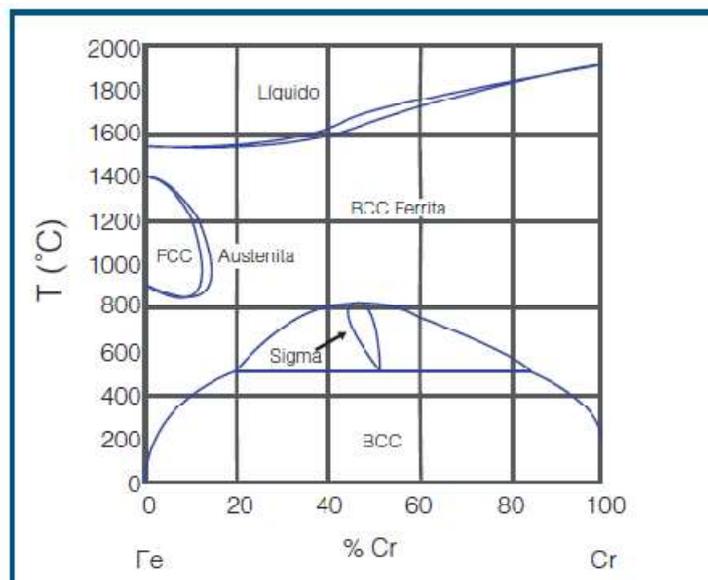


Figura 3.8: Diagrama fases cromo-hierro. [5]

3.4.1. Análisis del diagrama cromo-hierro

Cuando las aleaciones de cromo-hierro tienen un contenido de cromo inferior al 12%, transforman su estructura ferrítica a austenítica durante el calentamiento. Cuando se realiza un proceso de enfriamiento rápida hasta la temperatura ambiente, se consigue la transformación de la austenita en martensita. Para contenidos de cromo en valores del 12% y 13%, presentan una estructura de ferrita y martensita, formada por una estructura bifásica (α y γ), desde temperaturas elevadas hasta la temperatura ambiente con un enfriamiento rápido.

Las aleaciones cromo-hierro con más del 13% de cromo (Cr), conservan la estructura ferrítica desde la temperatura ambiente hasta temperatura de fusión. En el transcurso del calentamiento, la estructura no transcurre el campo austenítico, con lo que no es posible la austenización y su posterior temple para la formación de martensita.

3.4.2. Influencia del carbono

Es importante que el contenido de carbono este limitado para limitar que el campo gamma se expanda y de esa forma prevenir la formación de martensita. En la figura 2.8 se aprecia la influencia del carbono en la expansión del bucle gamma.

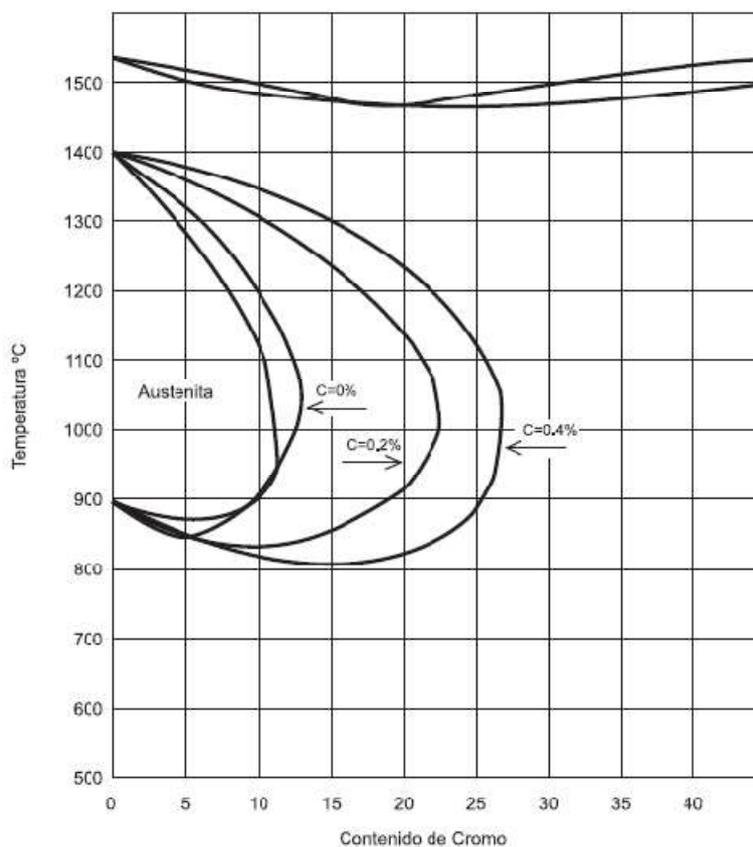


Figura 3.9: Influencia del carbono en la expansión del bucle gamma. [5]

Las conclusiones que se pueden extraer del gráfico de la figura 2.8, es que el bucle gamma es mayor y hacia la derecha, al aumentar el contenido de carbono, siendo que el carbono favorece la formación de fase gamma. Cuando el carbono alcanza el límite del bucle gamma, para un valor del 0.6%, el cromo queda limitado a un valor próximo al 18%.

Para cuando el carbono es superior al 0.4%, el bucle no se amplía, siendo el exceso de dicho carbono el que forma distintos tipos de carburos de hierro y cromo, que dependen de la temperatura, y del contenido de cromo y carbono. El máximo contenido de cromo en las aleaciones de cromo-hierro-carbono, es aproximadamente del 17% con estructura martensítica a temperatura ambiente.

4. Corrosión en los aceros inoxidables

4.1. Bases de la corrosión

La corrosión es un proceso de deterioro de los materiales metálicos, mediante reacciones químicas y electroquímicas. Estos materiales metálicos se obtienen a través del procesamiento de minerales y menas, que constituyen su estado natural, induciéndolos a un estado de energía mayor.

El proceso de corrosión ocurre cuando con el tiempo, los materiales tratan de alcanzar su estado natural, hacia un estado energético de menor potencial. Normalmente la mayoría de los procesos de corrosión, parten de reacciones de reducción-oxidación, también conocidas por reacciones electroquímicas.

La corrosión se divide a su vez en dos grupos: corrosión seca y corrosión húmeda. En la corrosión seca no hay presencia de etapa líquida o está por debajo del punto de humedad del ambiente, donde reaccionan los vapores de gases naturales, normalmente a altas temperaturas formando óxidos secos. En la corrosión húmeda el metal reacciona con soluciones acuosas, donde regularmente se produce una reacción electroquímica.

En las reacciones electroquímicas se necesitan de tres partes, para el desarrollo de la misma, siendo las siguientes: (a) unos electrodos (ánodo y cátodo), (b) un electrolito que realiza la función de medio conductor, siendo normalmente una solución acuosa, y (c) una conexión eléctrica entre ambos electrodos. En la figura 4.1 se representa un esquema de esta configuración para una reacción electroquímica, donde se denomina habitualmente celda electroquímica.

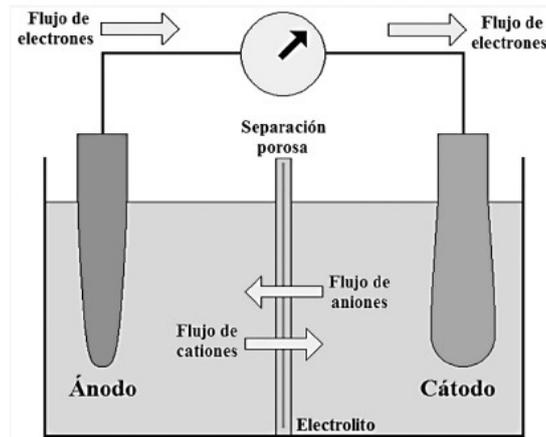


Figura 4.1: Esquema de una celda electroquímica. [6]

En el ánodo se produce la reacción de oxidación, mientras que en el cátodo se produce la reacción de reducción, y ambas ocurren de forma simultánea. En este caso el ánodo cede electrones al sistema, lo que provoca que aumente el número de oxidación, cambiando su estado metálico base a cationes que se disuelven en el electrolito. El material que actúa como ánodo es el que sufre la oxidación. Por el contrario, en el cátodo los aniones metálicos son los que absorben electrones, pasando a disminuir su número de oxidación.

El potencial electroquímico determina la resistencia a la corrosión de un material metálico, variando en función de la composición del electrolito. Teniendo una mayor resistencia a la corrosión cuanto mayor sea el valor del potencial electroquímico y menor resistencia a la corrosión cuanto menor sea su potencial electroquímico. En la figura 4.2, se indica la tabla galvánica de algunos metales y aleaciones comunes, respecto al potencial electroquímico de los mismos.



Figura 4.2: Serie galvánica para algunos metales y aleaciones comunes. [6]

Los productos que se puedan formar a causa del proceso de corrosión en la superficie del material, pueden afectar de modo positivo o negativo. Cuando la corrosión se produce en el hierro, en la superficie se genera una capa de herrumbre, cuya densidad es menor que la del metal base, lo que provoca que esta se desprenda con mayor facilidad y de esta forma siga el proceso de corrosión.

Para otros metales como el aluminio, el níquel o el cromo, los productos de la corrosión que se forman tienen una mayor densidad, que el metal base, lo que genera una capa superficial más sólida y estable, evitando que el proceso de corrosión se extienda en la superficie del mismo y protegiéndolo. Esto conocido como pasivación, proceso por el cual se denomina a un metal inoxidable, como es el caso de los aceros inoxidables.

4.2. Tipos de corrosión

Como se ha comentado anteriormente, existen dos grandes grupos, como son la corrosión seca y la húmeda. Siendo el principal tipo de corrosión sufrido por los aceros inoxidables la corrosión húmeda. También a su vez, dentro de la corrosión húmeda se establece la corrosión generalizada y localizada.

4.2.1. Corrosión húmeda generalizada

Normalmente es cuando se ha producido un debilitamiento uniforme en toda la superficie del acero, del film de pasivación. Sucede cuando se realiza una selección equivocada del tipo de acero inoxidable. Esto puede suceder cuando en un acero inoxidable del tipo ferrítico con un contenido en cromo bajo, es sometido a una solución de ácido sulfúrico a temperatura, la superficie termina por cubrirse de herrumbre del acero. Algunos de los métodos que son empleados para reducir estos efectos de la corrosión pueden ser, los recubrimientos, inhibidores y protecciones catódicas.

4.2.2. Corrosión húmeda localizada (intergranular)

Este tipo de corrosión por norma es sufrida por los aceros de la serie 300, que se exponen a temperaturas entre 430°C y 870°C, en las zonas próximas a la soldadura. Esto provoca que se formen carburos de cromo en los límites de los cristales de austenita, que terminen por reducir el contenido de cromo en dicha zona y por consiguiente quedando más expuesto a la corrosión. Para evitar la corrosión intergranular es recomendable utilizar aceros cuyo contenido en carbono sea bajo, como por ejemplo los del tipo L y empleando aceros estabilizados para cuando las condiciones de temperatura sean más críticas.

4.2.3. Corrosión húmeda localizada (por picaduras – Pitting)

La corrosión por picaduras se caracteriza por la formación de agujeros en la superficie del metal. Por lo general, estos agujeros pueden ser pequeños, dificultando su detección debido a la capa de corrosión general en la superficie. El pitting está asociado a discontinuidades localizadas del film de pasivación. El efecto del pitting se ve incrementado cuando las condiciones en la superficie del metal, se ven afectadas por agentes corrosivos, imperfecciones mecánicas, daños en la superficie del material o por fallos en la capa de óxido de cromo. La causa del pitting se produce cuando de forma localizada se rompe la capa de pasivación del metal.

4.2.4. Corrosión húmeda localizada (galvánica)

Este tipo de corrosión puede ser sufrida por cualquier tipo de acero inoxidable. Se produce cuando dos tipos de metales se ponen en contacto, teniendo cada uno de ellos un potencial de oxidación distinto y ambos en un mismo medio corrosivo. El más activo de los dos actuará como ánodo, con lo que su velocidad de corrosión será mayor y el más pasivo, denominado cátodo quedará protegido y su velocidad de corrosión será menor.

4.2.5. Corrosión húmeda localizada (bajo tensión - SCC)

La corrosión bajo tensiones es originada por tres factores como, un ambiente, un material susceptible y la presencia de tensiones, que terminan provocando un fallo en el material. El agrietamiento que sufre el material en este tipo de corrosión, se ve determinado fuertemente por la temperatura y donde la tensión umbral normalmente está por debajo del punto de fluencia del material. En estos casos se puede producir el fallo crítico, sin que apenas se perciban deformaciones importantes o un deterioro visible del material. En las soldaduras se generan cambios de temperatura, que pueden inducir tensiones residuales, que sumadas a ciertos tipos de ambiente pueden generar una rotura por corrosión bajo tensiones. Estas tensiones son generadas también por tracciones, deformaciones en frío, etc. Este tipo de corrosión se manifiesta como pequeñas fisuras en las zonas donde han sido expuestas a tensión.

4.2.6. Corrosión húmeda localizada (grietas)

Este tipo de corrosión se manifiesta en zonas estrechas entre dos superficies o también entre una superficie de metal y otra no metálica. Donde la aireación diferenciada entre la superficie externa y la grieta, le confiere un estado anódico que puede contribuir que en la grieta se genere corrosión. Algunas zonas típicas de este tipo de corrosión, pueden ser los rebordes, arandelas, juntas, empalmes roscados, etc.

4.2.7. Corrosión por fatiga

La fatiga con corrosión ocurre por acción de una tensión cíclica y ataque químico simultáneo. Lógicamente los medios corrosivos tienen una influencia negativa y reducen la vida a fatiga, incluso la atmósfera normal afecta a algunos materiales. A consecuencia pueden producirse pequeñas fisuras o picaduras que se comportarán como concentradoras de tensiones originando grietas. La de propagación también aumenta en el medio corrosivo puesto que el medio corrosivo también corroerá el interior de la grieta produciendo nuevos concentradores de tensión.

4.2.8. Corrosión marina

Este tipo de corrosión considera la posibilidad de elementos susceptibles de ser sumergidos en agua de mar, equipos o instalaciones que utilicen dicha agua o que estén sometidos a atmósferas marinas. El agua de mar, aparte de incluir sal (NaCl), también incluye otros elementos como gases disueltos y organismos vivos, que acentúan el fenómeno de corrosión. Las atmósferas marinas tienen un mayor impacto en la corrosión. Donde algunos de los factores que más influencia tienen en la velocidad de corrosión, son la humedad, viento, temperatura, contaminantes aerotransportados y organismos biológicos. En este tipo de corrosión es fundamental, el tipo de aleación que se emplee, los recubrimientos metálicos y orgánicos, y protecciones catódicas utilizadas para conseguir una protección frente a este tipo de corrosión.

5. Soldadura en los aceros inoxidables

5.1 Tipos de soldadura

Para la realización de las soldaduras de acero inoxidable es posible emplear gran parte de los procesos de soldadura existentes, aunque cabe destacar que los más empleados son: soldadura manual con electrodo revestido (SMAW), soldadura por arco bajo gas protector con electrodo no consumible (TIG-GTAW) y soldadura por arco bajo gas protector con electrodo consumible (GMAW), también conocida como (MIG) cuando el gas protector empleado es inerte.

Cabe destacar que existen otros procesos de soldadura que son empleados en producciones de mayor volumen o fabricaciones especiales, donde es posible emplear procesos de soldadura que puedan tener ciertas ventajas, respecto a los anteriormente nombrados. Uno de ellos es la soldadura por arco con electrodo tubular, la cual genera una soldadura de mayor calidad en los aceros inoxidables y con una eficiencia mejor que con la soldadura de electrodo revestido (SMAW). Por ejemplo para cuando es necesario realizar soldaduras de piezas con espesores mayores a 6 mm, el proceso de soldadura por arco sumergido (SAW) resulta tener mejor aplicación y más rentable. Un proceso de soldadura no recomendado para los aceros inoxidables, es la soldadura

oxiacetilénica, debido a que genera óxidos de cromo con un punto elevado de fusión, que es mayor que el punto de fusión del metal base. Como consecuencia estos óxidos no se funden, quedando en la superficie de la soldadura y generando una pérdida de resistencia a la corrosión.

5.2 Aspectos operativos

Dentro del campo de los aspectos operativos, se ha detallado aquellos que son más específicos de la soldadura de aceros inoxidable. La soldadura de los aceros inoxidable, normalmente genera un baño mucho menos fluido que otro tipo de aceros y su penetración es menor. La forma de reducir estos inconvenientes es por medio de las operaciones de preparación previas y la separación de los bordes. Por lo que es recomendable realizar un chaflán en los bordes, a fin de mejorar la fluidez del baño de fusión y su penetración. Con motivo de que los aceros inoxidable tienen un mayor resistencia eléctrica debido a su estructura interna y composición, los niveles de intensidad de corriente en las soldaduras por arco eléctrico, son mayores a las empleadas en otros aceros comunes. Los valores de referencia están en el orden del 25 al 50%.

En el caso de emplear valores de intensidad de corriente excesivamente bajos, pueden provocar que el arco sea inestable, teniendo interferencias de la escoria con el arco, lo que hará que se pegue al electrodo y termine generando un cordón cuya forma no sea la adecuada. Para cuando los valores de intensidad de corriente son excesivamente elevados, generará mucho salpicado y una falta de control sobre el baño de fusión, lo que terminará provocando fisuras y una pérdida de resistencia a la corrosión, debido a la pérdida de cromo que ha sufrido en la composición del cordón de soldadura.

Por otra parte, la posición a emplear en el electrodo está condicionada por la técnica de avance que sea utilizada. Las posiciones de avance pueden ser las siguientes: soldadura a derecha, a izquierda, en vertical, en cornisa y en techo.

5.2.1. Soldadura a derecha

Con la técnica de avance a derecha, se consigue mayor penetración y avance. También se reduce el riesgo de inclusiones de escoria, se reduce la formación de poros o la falta de fusión del baño. El baño de fusión generado es más caliente y fluido, lo que requiriendo una mayor habilidad por parte del soldador. La ejecución realizada es por medio de pasadas estrechas. En la figura 5.1 se muestra un esquema de cómo es la posición de avance a derecha.

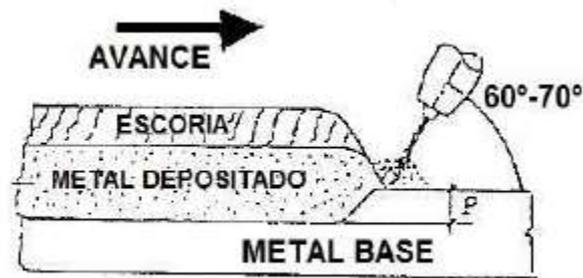


Figura 5.1: Posición de avance a derecha. [7]

5.2.2. Soldadura a izquierda

La soldadura ejecutada con la posición a izquierda, al contrario que la ejecutada a derecha, tiene una menor penetración y por eso mismo es empleada para espesores de chapa más finos. Necesita de menor intensidad de corriente y en consecuencia aporta menos calor al proceso. Tiene posibilidad de formación de poros y falta de fusión. Los cordones con esta técnica son más anchos. En la figura 5.2 se muestra un esquema de cómo es la posición de avance a izquierda.

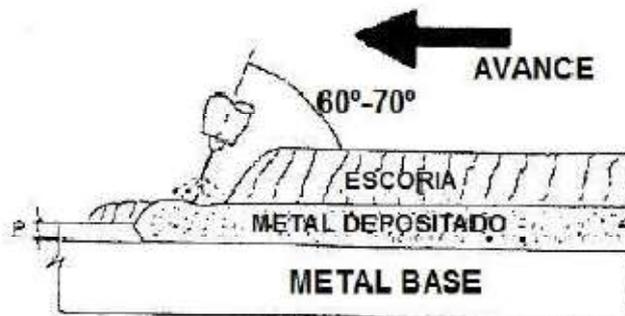


Figura 5.2: Posición de avance a izquierda. [7]

5.2.3. Soldadura en vertical

En este caso es recomendable que la posición del electrodo sea perpendicular a la pieza y que se realice una ligera oscilación, con el fin de conseguir más anchura en el cordón de soldadura. En la figura 5.3 se muestra como es la posición de avance en vertical.

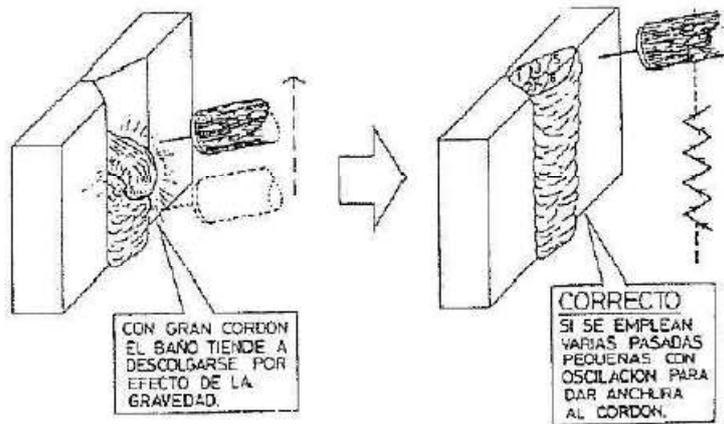


Figura 5.3: Posición de avance en vertical. [7]

5.2.4. Soldadura en cornisa

Al utilizar este tipo de posición de posición de avance, el baño de cordón inferior tiene tendencia al descuelgue y el baño de cordón superior tiene tendencia a gotear debido a la gravedad. Similar a la posición de avance anterior, son recomendables varias pasadas y un movimiento alternante de abajo a arriba para evitar los inconvenientes mencionados. En la figura 5.4 se muestra como es la posición de avance en cornisa.

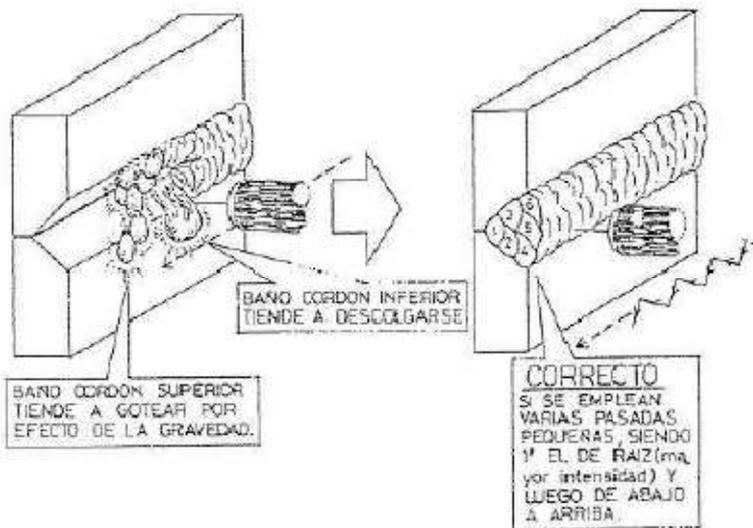


Figura 5.4: Posición de avance en cornisa. [7]

5.2.5. Soldadura en techo

En la posición de avance en techo, al igual que la anterior, es aconsejable el realizar varias pasadas con un cordón más pequeño. De esta forma se evitan las descolgaduras en el cordón de soldadura. Al igual que emplear intensidades de corriente lo más bajas posibles, para así poder mantener el arco estable y que el cordón permanezca recto. Se alcanzan soldaduras con mejor resistencia a la corrosión y debido al menor aporte energético, se disminuye el riesgo de fisuración en el cordón y las deformaciones. En la figura 5.5 se muestra como es la posición de avance en techo.

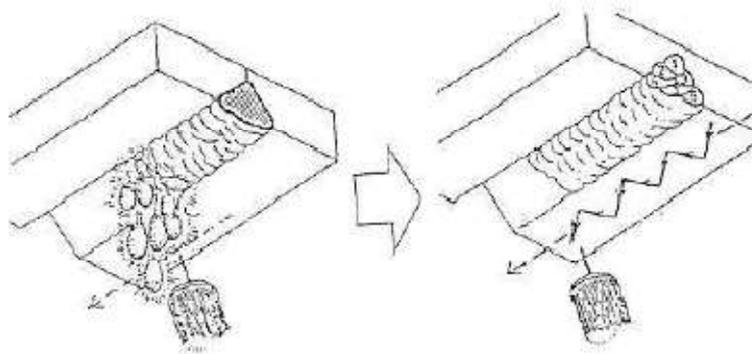


Figura 5.5: Posición de avance en techo. [7]

5.3 Operaciones de corte y montaje

Para el acero inoxidable es posible utilizar los mismos métodos de corte que los que se emplean habitualmente para los aceros al carbono, con la excepción del corte oxiacetilénico, en el cual se generan óxidos de cromo, los cuales tienen un punto de fusión superior al del metal base, lo que provoca que el corte no sea limpio y con precisión. A continuación se indica en la tabla 5.1 los métodos de corte en función de la geometría y espesor de las piezas de acero inoxidable.

Método	Espesor/Geometría	Observaciones
Guillotina	Láminas, cintas, placas finas	Se debe realizar una preparación previa del borde expuesto al ambiente para eliminar el riesgo de formación de rendijas.
Corte por sierra y abrasivo	Amplio rango de espesores	Se recomienda eliminar restos de lubricantes o líquidos de corte antes de proceder a la soldadura o al tratamiento térmico previo.
Maquinado	Formas geométricas variadas	Se recomienda eliminar restos de lubricantes o líquidos de corte antes de proceder a la soldadura o al tratamiento térmico previo.
Corte con arco de plasma	Amplio rango de espesores	Antes de soldar, se debe amolar los bordes y superficies cortadas para limpiar bien el metal.
Corte con polvo metálico	Amplio rango de espesores	Se trata de un corte menos preciso que el corte con plasma, y además una vez efectuado el corte se deben eliminar todas las escorias formadas.
Corte por arco de grafito	Usado para acanalar la parte posterior del cordón de soldadura y para cortar piezas con formas irregulares	Antes de soldar, se deben amolar los bordes y superficies cortadas para limpiar bien el metal.

Tabla 5.1: Métodos de corte del acero inoxidable. [7]

5.4 Preparación de bordes

En este apartado se mostrarán algunos de los diseños de junta típicos en la soldadura de chapas y planchas. El diseño típico se muestra en las figuras 5.6 a 5.10 y el diseño típico para juntas de tubos mediante soldadura MIG, se muestra en las figuras 5.11 y 5.12. Se debe considerar en la separación de los bordes, que una anchura mayor encarecería la soldadura, debido a la mayor aportación de material y una menor separación puede provocar una falta de penetración en el cordón de soldadura, lo que sería una mala unión.

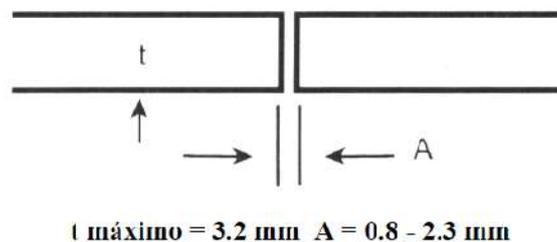
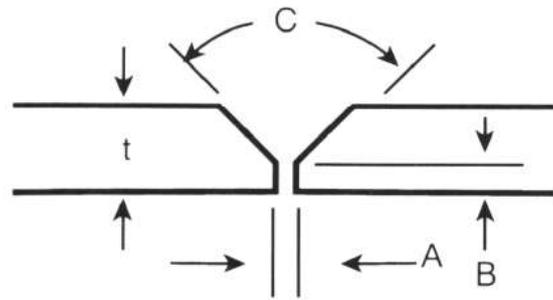


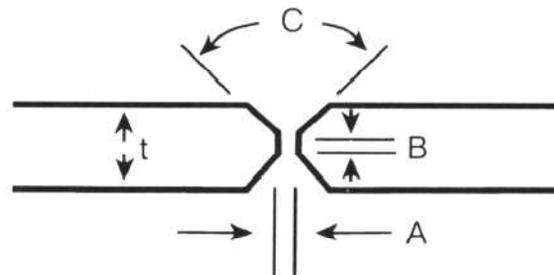
Figura 5.6: Junta para soldaduras a tope de chapas. [9]



t máximo = 12.7 mm A = 0.8 - 2.4 mm

B = 1.6 - 2.4 mm C = 60 a 80°

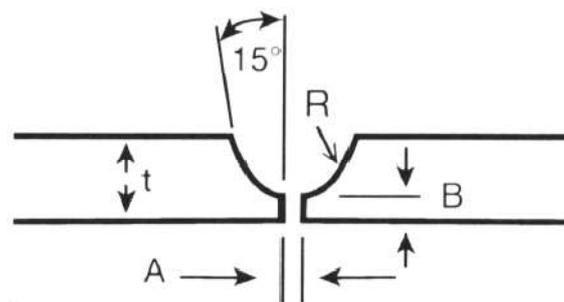
Figura 5.7: Junta en V para chapas y placas. [9]



t = 12.7 mm o mayor A = 0.8 - 2.4 mm

B = 1.6 - 2.4 mm C = 60 a 80°

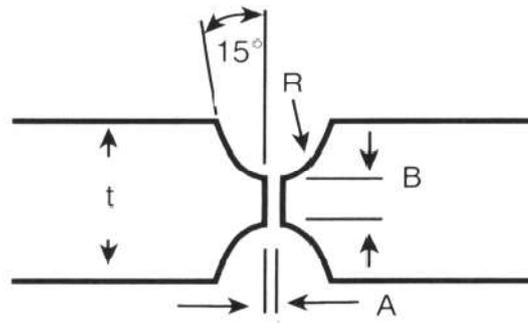
Figura 5.8: Junta doble en V para placas. [9]



t = 19 mm y más A = 1.6 mín. - 3.2 máx. (mm)

B = 1.6 - 2.4 mm R = 6.4 mm mín.

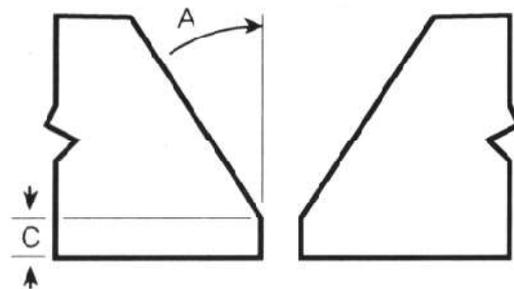
Figura 5.9: Junta en U para placas. [9]



$t = 19 \text{ mm y más}$ $A = 1.6 \text{ mm mín.} - 3.2 \text{ mm}$

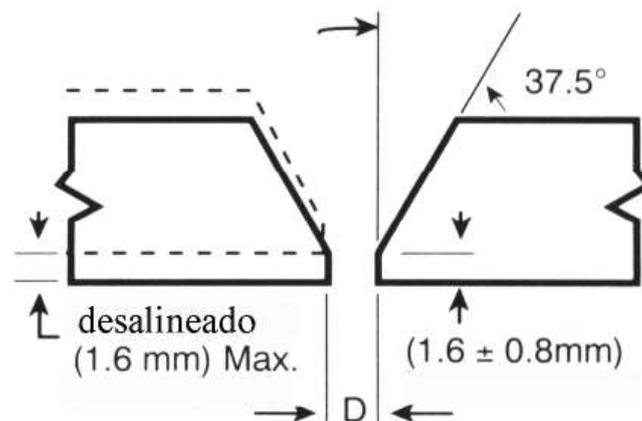
$B = 1.6 \text{ a } 2.4 \text{ mm}$ $R = 6.4 \text{ mm mín.}$

Figura 5.10: Junta doble en U para placas. [9]



$A = 37.5 \pm 2.5^\circ$ $C = 1.8 \pm 0.9 \text{ mm}$

Figura 5.11: Junta para caños con inserto consumible. [9]



$D <$ diámetro del metal de aporte

$D >$ diámetro del metal de aporte para el método de alimentación continua

Figura 5.12: Junta para caños sin inserto consumible. [9]

5.5 Punteado y alineación de la soldadura

Resulta importante que el alineamiento de las piezas a soldar sea el adecuado, para poder conseguir una buena continuidad del cordón de soldadura, como evitar también las deformaciones en la pieza. Normalmente cuando se tienen las piezas posicionadas, luego se realiza un punteo de la junta entre ellas dos, para conseguir el alineamiento y separación adecuada.

Es posible que durante el proceso de punteado, se desalineen las piezas, por lo que suele realizarse un punteado en los extremos y luego en el centro, para posteriormente seguir punteando según el avance en el centro de cada tramo que va realizando. Cuando se realiza el punteado por un extremo de la pieza hasta el otro extremo, la pieza termina teniendo deformaciones y desalineada. En los aceros inoxidable los puntos de soldadura para el alineado de las piezas, se realiza a menor distancia entre ellos, ya que tiene una mayor expansión térmica.

Para piezas de grosor más fino, las puntadas se recomiendan que tengan una anchura entorno a 3 ó 4 mm, empleando para espesores más gruesos, puntadas de soldadura entorno a los 20 mm. Otra recomendación para poder controlar el tamaño de las puntadas, es emplear el procedimiento de soldadura TIG. A continuación se representa en la figura 5.13 como sería la secuencia correcta de puntadas, en la unión soldada de dos piezas y en la figura 5.14 cuando se realiza desde un solo lado, produciendo deformaciones y desalineados.

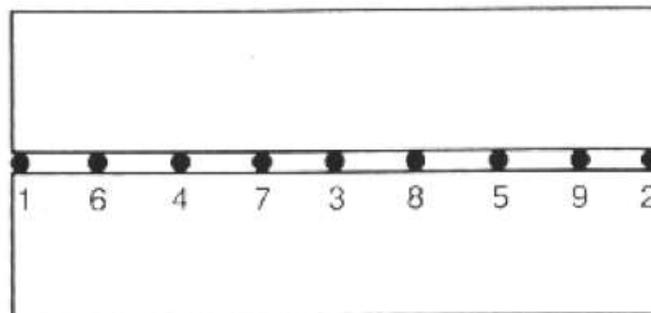


Figura 5.13: Secuencia de puntadas adecuado. [9]

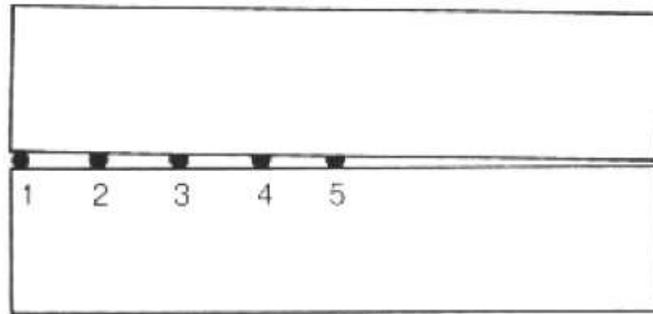


Figura 5.14: Puntadas realizadas desde un solo lado, con la consecuencia de deformaciones y desalineados. [9]

5.6. Material de respaldo

Las barras de respaldo son empleadas cuando no existe la posibilidad de realizar la soldadura por ambos lados. En estos casos se emplean las barras de respaldo en el lado contrario con el objetivo de tener un mejor cordón de soldadura, una penetración adecuada y evitar posibles grietas, con lo que se conseguirá disminuir el efecto que tales defectos tienen en la corrosión de los aceros inoxidable. El material que normalmente es empleado para estas barras de respaldo es el cobre, por su alta conductividad térmica. Algunos de los diseños más habituales de barras de respaldo para usar con o sin gas de respaldo, se muestran en la figura 5.15.

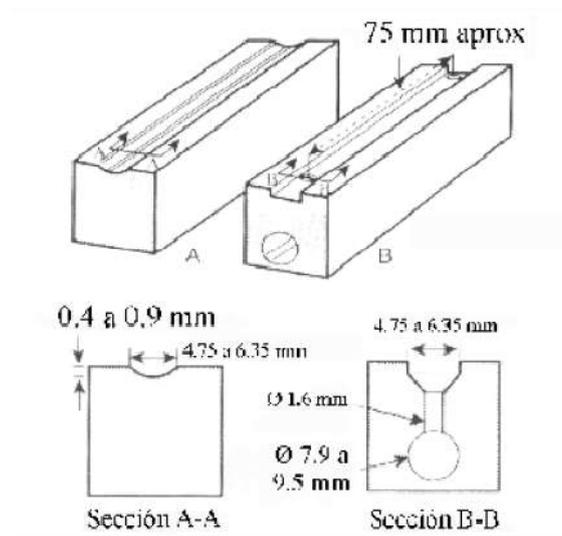


Figura 5.15: Diseño de ranuras en barras de respaldo. (A) Ranura estándar para uso sin gas de respaldo. (B) Ranura cuadrada empleada con gas de respaldo. [9]

La barra de respaldo en un proceso de soldadura normal, provoca el enfriamiento del metal. El mal direccionado del arco puede provocar que se funda parte del cobre y que de esta forma se introduzca en la soldadura de acero inoxidable o que se produzca una rajadura en la soldadura.

Lo que hace recomendable el decapado después de realizar la soldadura y así eliminar posibles restos de cobre en la superficie. El respaldo con gas argón confiere una muy buena protección en el lado interno de la soldadura TIG. El otro gas de respaldo, el nitrógeno, también es empleado para tal fin, siendo su costo competitivo, pero teniendo la precaución de que no se introduzca en la atmosfera del arco, ya que puede cambiar la composición de la soldadura.

5.7. Nivel de penetración

El nivel de penetración es importante, ya que de ello depende que las características mecánicas finales obtenidas sean las máximas. Para tal fin, la penetración debe ser completa, rellenando por completo todo el espacio entre las piezas soldadas. Hay que evitar a toda costa la falta de penetración en la soldadura, ya que se pueden originar huecos o rendijas donde no ha llegado el material, y que son las causantes de disminuir la resistencia mecánica de la soldadura.

También se produce al mismo tiempo, que en estos huecos se genera una falta o escasez de oxígeno, que provoca la incorrecta formación de la capa de óxido de cromo en la superficie del acero. Es decir, no da lugar a la pasivación correcta del acero. Siendo estos huecos y rendijas puntos débiles, donde se puede originar el origen de la corrosión.

Una consecuencia de que los aceros inoxidables tengan un baño de soldadura menos fluido, es que su nivel de penetración también es menor. Por ello hay que tener la precaución, de tener mayor espacio en el cordón para facilitar la propia penetración.

5.8. Humedad

La humedad es un parámetro que puede producir porosidades, por lo que el electrodo como el metal base deben estar ausentes de humedad. Dicha humedad depende de la exposición a fuentes de humedad y a las propiedades higroscópicas del revestimiento de los electrodos inoxidables. Algunas fuentes de humedad son, agua de enfriamiento en la soldadura, guantes húmedos, paños húmedos, humedad en el aire comprimido, etc.

Los electrodos de acero inoxidable no deben estar expuestos a humedades relativas superiores al 50%, ya que se deberá reacondicionar en horno a 300°C y 1 hora de tiempo. Cuando se dan problemas de humedad los primeros síntomas son la dificultad

para remoción de la escoria y la porosidad visible en la soldadura. En el caso de que los electrodos se hayan mojado, se deben descartar por otros nuevos.

5.9. Limpieza

El proceso de limpieza no es menos importante, ya que de lo contrario se pueden generar defectos en la soldadura como son, fisuras, porosidades, falta de fusión y pérdida de resistencia a la corrosión en la soldadura y en la zona afectada térmicamente (ZAT). Con la finalidad de reducir o evitar estos fallos, se detallan a continuación una serie de recomendaciones:

- a) Limpieza de los bordes de la junta e incluso alrededor de 50 a 75 mm de la superficie adyacente.
- b) En el caso de que la soldadura no sea inminente, se puede cubrir la superficie limpiada.
- c) Las juntas deben estar limpias de óxidos superficiales que se quedan después de realizar el corte por métodos térmicos.
- d) Si las superficies han estado en contacto con productos químicos, se aconseja que antes de realizar la soldadura, se eliminen residuos alcalinos con soluciones ácidas y residuos ácidos con soluciones alcalinas, para un posterior lavado con agua caliente.
- e) Las superficies que en su condición de servicio han estado expuestas a temperaturas altas, se recomienda que se limpie por esmerilado.
- f) En soldaduras multipasada, se puede remover la escoria entre cordones, evitando así que quede atrapada y que genere puntos de fragilidad.
- g) Después de la soldadura es necesario remover la escoria, para que la soldadura quede expuesta al aire y pueda el metal realizar la pasivación del mismo.
- h) Utilizar métodos de detección de incrustaciones de hierro, con la finalidad de detectar manchas de óxido. Se puede realizar una prueba más eficiente con una solución de 94% agua destilada, 3% ferrocianuro de potasio y 3% de ácido nítrico al 60-70% aplicada con un rociador. Después de unos minutos pueden aparecer manchas de color azul, lo cual indica la presencia de hierro en las mismas, para posteriormente limpiar con agua o un paño húmedo. En la norma ASTM A380 “Standard Recommended Practice for Cleaning and Descaling

Stainless Steel Parts”, se hace referencia a los procedimientos de limpieza y decapado, siendo una directriz a seguir.

Para el caso de contaminantes tipo aceites o grasas, se puede seguir el siguiente procedimiento:

- Con un trapo limpio eliminar el exceso de aceite o grasa.
- Limpiar el área a soldar una distancia aproximada de 50 mm a cada lado, con un solvente orgánico. En el caso de solventes orgánicos clorados, tienen el problema que pueden perdurar y concentrarse en fisuras, lo que posteriormente puede provocar el inicio de procesos de corrosión. Por este motivo es preferible el uso de solventes no clorados para el acero inoxidable.
- Después de la aplicación de los solventes y de haber transcurrido un tiempo para que estos realicen su función, se deben eliminar por completo mediante el secado con un trapo.
- La limpieza completa pasa por asegurar que el trapo empleado para el secado, está libre de residuos.

5.10. Ventilación

La ventilación en los procesos de soldadura es importante para poder minimizar la exposición a los humos generados en el proceso de soldadura o de corte de metales. También es importante la posición del trabajador durante el proceso de soldadura, donde se debe posicionar de manera que este fuera de la trayectoria de los humos desprendidos por la soldadura. Siendo los humos de soldadura de composición varia, debido a los diferentes metales de aporte y procesos de soldadura.

En la soldadura de acero inoxidable, el material de aporte con contenidos en cromo y en menor medida de níquel, pasan a estar presentes en los humos y en consecuencia son un riesgo para la salud. Una referencia a seguir en medida de seguridad en la soldadura es la norma ANSI/ASC, Z49.1-88, “Safety in Welding and Cutting”, publicada por la American Welding Society.

5.11. Procesos de soldadura más empleados en aceros inoxidables

5.11.1. Soldadura por arco manual con electrodo revestido (SMAW)

La soldadura por arco manual con electrodos revestidos, tiene varias denominaciones, Shield Metal Arc Welding (SMAW) y Manual Metal Arc (MMA).

Se caracteriza por la formación de un arco eléctrico entre la pieza a soldar y el electrodo con revestimiento. Este arco produce que se funda el electrodo y que se queme el revestimiento, creando una atmósfera idónea para que las gotas de metal fundido lleguen al baño de fusión en el metal base. Estas gotas se proyectan con un recubrimiento de escoria que procede del recubrimiento del electrodo y que debido al efecto de su densidad, tensión superficial y viscosidad, flota en la superficie donde se solidifica y forma una capa que protege al baño fundido. Este tipo de soldadura es discontinua, por lo que es necesario reponer el electrodo en la pinza portaelectrodos cuando se termina. En la figura 5.16 se muestra un esquema de cómo es la soldadura SMAW.

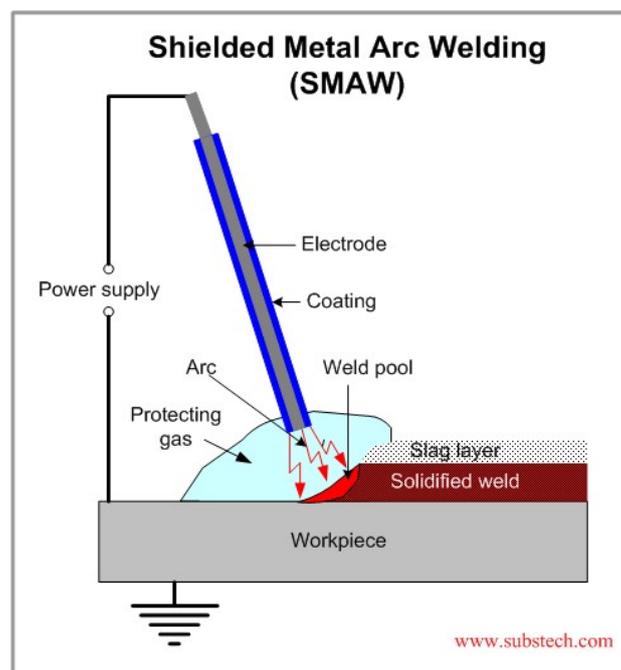


Figura 5.16: Esquema de la soldadura por arco manual con electrodo revestido (SMAW). [10]

5.11.1.1. Electrodo y fabricación

Los electrodos empleados en la soldadura SMAW consisten en una varilla metálica, donde normalmente es acero y que tiene un revestimiento concéntrico de flux extruido y seco. El proceso para la fabricación de los electrodos se compone de dos etapas: la varilla y el revestimiento.

Para la varilla se emplea como materia prima el alambón de 5,5 mm de diámetro, suministrado en bobinas con un peso aproximado de 1.000 kg. La composición del alambón se comprueba por medio de un análisis químico a partir de un despunte de la bobina, y seguidamente pasa a una devanadora, donde el alambón se retuerce y somete a varios doblados y cepillados para desprender el óxido adherido en el tren de laminado en caliente (decapado mecánico). El paso siguiente es el de pasar a las cajas de trefilado,

donde se reduce progresivamente el diámetro, con ayuda de lubricantes hasta finalizar el proceso. Finalmente se realiza una limpieza del lubricante adherido a la superficie y se procede al enderezado y corte de las varillas, con una velocidad entre 580 y 1.400 cortes/min, según el diámetro de la varilla. Algunas de las medidas más empleadas en los diámetros de la varilla son: 1,6-2-2,5-3-3,25-4-5-6 mm.

Para los revestimientos existe mucha variedad de minerales y sustancias, como la arena de circonio, rutilo, celulosa, caolín, mármol, aditivos reológicos que facilitan el prensado y la extrusión de la mezcla húmeda. El fabricante mantiene cierto secretismo sobre cuál es la selección de sustancias y su dosificación. Como aglutinante de la mezcla seca se emplea el agua, silicato sódico o silicato potásico. Por medio de una prensa se aplica el recubrimiento en toda la longitud de la varilla. La excentricidad se comprueba por medio de un cepillado realizado en ambos extremos de la varilla, con la finalidad de conseguir ajuste en un extremo para la pinza portaelectrodos y en el otro extremo, facilitar el cebado del arco. El secado se realiza mediante hornos con un incremento gradual de la temperatura, evitando las grietas y desprendimientos en el revestimiento. Los datos identificativos de los electrodos es según indica la American Welding Society (AWS).

5.11.1.2. Composición del revestimiento

El revestimiento suele estar formado por sustancias orgánicas y minerales, siendo compleja su composición. Algunas de las sustancias empleadas para los revestimientos son:

- Óxidos naturales: óxido de hierro, ilmenita, rutilo, etc.
- Silicatos naturales: talco, caolín, mica, etc.
- Productos químicos: carbonatos, óxidos, etc.
- Productos orgánicos: celulosa, serrín, etc.
- Fundentes: espato flúor,...
- Ferroaleaciones: Mn, Si, Ti, etc.
- Aglomerantes: silicato sódico, silicato potásico,...

5.11.1.3. Funciones del revestimiento

Las funciones que puede desempeñar el revestimiento son tres: eléctrica, física y metalúrgica. En relación a las *funciones eléctricas* se tienen:

- Cebado de arco: Debido a que la disociación es un proceso endotérmico (reacción química que absorbe energía), el revestimiento que está formado por sustancias disociables, exige que las tensiones de cebado en el arco sean mayores. Los silicatos, carbonatos, óxidos de Fe, óxidos de Ti, actúan de forma que ayudan al cebado y mantienen el arco.

- Estabilidad del arco: Está depende entre muchos factores, del estado de ionización de los gases que se encuentran entre el ánodo y el cátodo. En el caso de la corriente alterna, se requiere que esta columna de gases entre el ánodo y el cátodo este fuertemente ionizada, para que de esta forma venza la inercia del arco. Debido a esto en el revestimiento se añaden polvos metálicos (Mg y Al) y sales (Na y K).

En relación a las *funciones en la parte física*:

- Uno de los principales objetivos del revestimiento es impedir el contacto del metal fundido con el oxígeno, nitrógeno e hidrógeno presentes en el aire. En primera instancia por la formación de una gas protector que rodea la zona de metal fundido y en segunda instancia, por la formación de escoria que flota por encima del metal fundido protegiendo a la misma.

También el revestimiento debe permitir el poder realizar la soldadura en el mayor número de posiciones. En esto último intervienen dos factores, el espesor del revestimiento que condiciona el acceso del electrodo a la raíz y la propia naturaleza del mismo, ya que esta define la viscosidad y temperatura a la cual la escoria se solidifica, para que pueda mantener las gotas de metal fundido en su posición por su propia tensión superficial y el rendimiento del electrodo.

La velocidad a la que se consume el revestimiento en el arco, es menor que la del alma metálica. Esto produce que el revestimiento en el extremo del alma sea más largo, haciendo que quede un cierto hueco en dicho extremo, que hará la función de dirigir y concentrar las gotas fundidas de metal y también de aislamiento térmico, reduciendo las pérdidas de calor.

En relación a las *funciones en la parte metalúrgica*:

- El revestimiento tiene elementos que al fundirse con el metal depositado, tienen el objetivo de mejorar las características mecánicas del mismo. La escoria evita que el baño entre en contacto con otros elementos como el oxígeno, hidrogeno y nitrógeno; produce una micrometalurgia en el baño, desoxidando, desnitrurando, defosforando y desulfurando el metal fundido; elimina impurezas, lo que reduce el número de poros e inclusiones en la soldadura; disminuye la velocidad de enfriamiento del cordón.

5.11.1.4. Especificaciones

Las especificaciones empleadas para los aceros inoxidables según la American Welding Society (AWS) y las Euro Normas son, AWS-A.5.4 y EN-1600. Estos electrodos se clasifican según composición química, propiedades mecánicas y tipo de corriente. Los electrodos para los aceros inoxidables tienen un contenido en Cr superior al 4% y contenido en Ni no superior al 37%. El sistema de clasificación es similar al empleado para los electrodos de acero al carbono y de baja aleación. Se presenta a continuación dos ejemplos de clasificación, como son el E310-15 y el E310-16.

El prefijo E indica un electrodo, y los tres primeros dígitos corresponden al tipo de aleación, donde estos pueden ir seguidos de una o más letras que indiquen una modificación, como es el caso de E310Mo-15. Los siguientes dos dígitos corresponden a la posición de soldadura y el tipo de corriente empleada en la soldadura.

El número 1 indica que los electrodos pueden ser empleados en todas las posiciones de soldadura, hasta diámetros de 4 mm. El número 5 indica que los electrodos están fabricados para su uso en corriente continua polaridad directa. El número 6 significa que los electrodos pueden ser empleados para corriente alterna, como para corriente continua polaridad directa.

5.11.1.5. Tipo de corriente

La corriente continua es más común pero a pesar de ello, también existen electrodos en el mercado que emplean la corriente alterna, haciendo que esta última empiece a tener cierta relevancia. En la tabla 5.2 se resumen algunas ventajas e inconvenientes de ambos tipos de corriente.

Características	Corriente Continua	Corriente Alterna
Pérdida de tensión en cables	Los cables han de ser tan cortos como sea posible	Preferible para soldar a gran distancia de la fuente
Electrodos	Son válidos todos los tipos de electrodos	El revestimiento debe contener sustancias que restablezcan el arco
Encendido del arco	Fácil	Más difícil sobre todo en electrodos de pequeño diámetro
Mantenimiento del arco	Fácil	Más difícil, excepto cuando se utilizan electrodos de gran rendimiento
Efecto de soplo magnético	Muy sensible, sobre todo cuando la soldadura está cerca de los extremos de la pieza. El efecto se incrementa con la intensidad	Es raro que se produzca. La alternancia de ciclos neutraliza los campos magnéticos
Salpicaduras	Poco frecuentes	Más frecuentes, debidas a la pulsación
Posiciones de soldeo	Más fácil de usar en posición para soldaduras de secciones gruesas	Fácil de usar en cualquier posición si se dispone del electrodo adecuado
Soldadura de pequeños espesores	Preferible	Si no se actúa con gran precaución, se puede deteriorar el material debido a la dificultad de encendido del arco
Soldaduras de secciones gruesas	Rendimiento bajo	Preferible, pues al poder utilizarse mayor diámetro de electrodo y más intensidad de corriente se logran mayores rendimientos

Tabla 5.2: Comparación empleo corriente alterna y corriente continua. [11]

5.11.1.6. Aplicaciones

El proceso de soldadura SMAW es empleado ampliamente en sectores como, la construcción naval, máquinas, estructuras, tanques, esferas de almacenamiento, puentes, calderería, etc. Siendo de vital importancia la selección adecuada de los electrodos para una calidad y coste de la soldadura óptimos. Por estos motivos los fabricantes de electrodos, en sus catálogos proporcionan una información lo más detallada de las características de los mismos, como los diámetros, uso, tipo de revestimiento, consejos para su almacenaje, funcionamiento, etc.

5.11.2. Soldadura por arco bajo gas protector con electrodo no consumible (GTAW)

La soldadura por arco bajo gas protector con electrodo no consumible es conocida también como TIG, Tungsten Inert Gas ó WIG, Wolfram Inert Gas. Este tipo de soldadura emplea el arco eléctrico que salta desde el electrodo no consumible a la

pieza a soldar, para realizar la fusión del material de aporte proporcionado por varillas, y protegiendo la zona de fusión mediante un gas inerte. En la figura 5.17 se representa como es proceso de soldadura TIG.

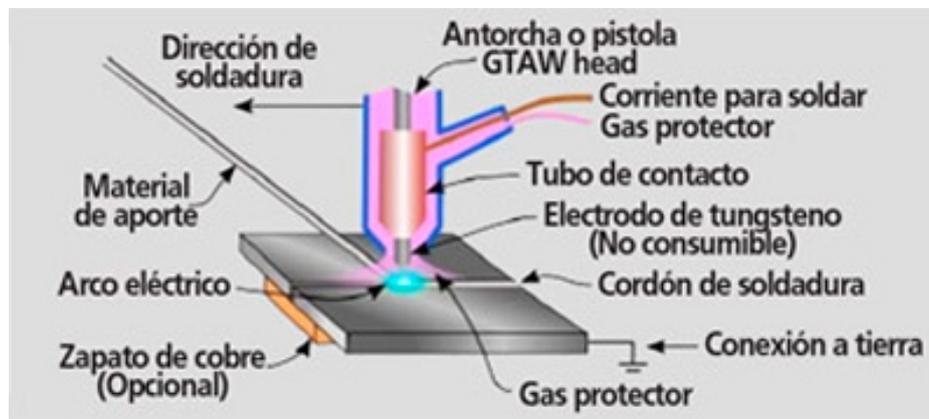


Figura 5.17: Esquema del proceso en la soldadura TIG. [12]

La soldadura TIG ó GTAW, en esencia es un proceso manual y que para ciertas fabricaciones el proceso se ha automatizado, como es el caso de fabricaciones en serie e incluso también pueden ser robotizadas. En el proceso manual requiere de cierta destreza por parte del soldador, lo cual hace que estén más cotizados en el mercado laboral. También puede ser empleada en gran variedad de uniones, posiciones y materiales, como aceros al carbono, aceros inoxidable, etc.

5.11.2.1. TIG con arco pulsado

Cuando se emplea el proceso de soldadura TIG en espesores pequeños, se dificulta el control del baño y de la penetración, si se emplea corriente continua. A través de una corriente pulsada se obtiene un mayor control a niveles bajos de energía, que son los requeridos por piezas de espesor más fino. Este tipo de soldadura TIG con arco pulsado, consiste en cambiar de una intensidad baja que es la mínima requerida para mantener el arco y permitir que se enfríe el baño en la soldadura, a un nivel de intensidad más alto seleccionado para poder conseguir la fusión. Las bajas frecuencias de pulso son empleadas cuando es necesario un acabado con cierta estética, también denominado comúnmente “escamas”. Por el contrario las altas frecuencias de pulso son empleadas para conseguir una mayor velocidad de soldadura y un baño de soldadura más profundo y estrecho. Este tipo de soldadura es empleada en piezas cilíndricas, evitando de esta forma el aumento de velocidad de recorrido para mantener el ancho de soldadura uniforme. En la figura 5.18 se indica la relación intensidad-tiempo empleada en la soldadura TIG por pulsos, mediante gráfica.

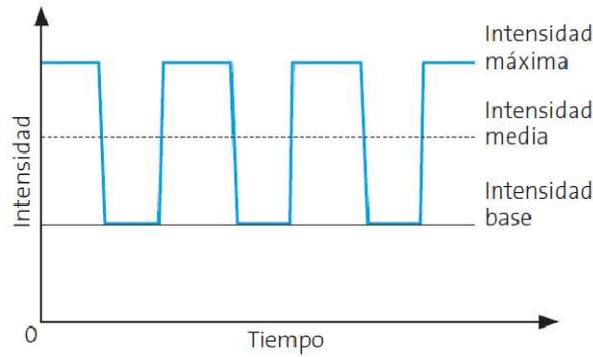


Figura 5.18: Relación intensidad-tiempo en la soldadura TIG por pulsos. [15]

5.11.2.2. Varillas consumibles

El material de aportación mediante el proceso de soldadura TIG, se realiza mediante varillas consumibles de composición química similar a la del material base, ya que este proceso de soldadura no produce escorias y es realizado en una atmosfera inerte que no provoca reacciones en el baño.

5.11.2.3. Gases de protección

Los gases empleados en este tipo de soldadura son: inertes (Ar y He); poco activos (N_2); activos oxidantes (CO_2 , O_2); activos reductores (H_2). Los fenómenos que suceden en el proceso de soldadura son *disociación* e *ionización*. El fenómeno de disociación es la separación con carácter reversible, de los gases poliatómicos en sus átomos. Siendo el fenómeno de ionización, la separación con carácter reversible, de los átomos o moléculas del gas en iones y electrones. Estos fenómenos se consiguen mediante una aportación de energía al gas de protección, a través del arco eléctrico en el proceso de soldadura. En la tabla 5.3 se indican algunos valores de energía de disociación e ionización, de algunos gases.

Gas	Energía de disociación (eV)	Energía de ionización (eV)
H_2	4,5	13,6
O_2	5,1	13,6
CO_2	4,3	14,4
N_2	9,8	14,5
Ar		15,8
He		24,6

Tabla 5.3: Energías de disociación e ionización de algunos gases. [11]

El gas disociado o ionizado cuando entra en contacto con la pieza a soldar, sufre un enfriamiento en el que se produce un cambio de estado, de plasma a gas liberando la energía de ionización o disociación que se transmite a la pieza.

Argón

Este gas es monoatómico, incoloro, y pertenece al grupo de los gases inertes. Su presencia en la atmósfera es del orden del 0,94% en volumen. Su obtención es a partir de la destilación fraccionada del aire líquido, donde la norma EN-439 lo clasifica como I-1. Tiene una densidad elevada y confiere una elevada protección al arco. Su energía de ionización es baja, 15,8 eV, con lo que favorece el cebado y que los arcos sean estables. Debido a que su energía de ionización es baja, los arcos son pocos energéticos y resulta recomendable su empleo para espesores pequeños. Posee una conductividad térmica baja, por lo que se concentran grandes cantidades de energía en el arco produciendo penetraciones características.

Helio

El Helio es un gas monoatómico, incoloro, inodoro, que pertenece al grupo de los gases inertes. Su presencia en la atmósfera es del 0.0015% en volumen y ciertos yacimientos de gas natural, es posible encontrar cantidades del orden del 10%. En Estados Unidos es económico su uso, debido a su presencia en el crudo de los pozos de petróleo. La norma EN-439 lo clasifica como I-2.

Tiene una densidad menor que el Argón, siendo necesario que el caudal de Helio sea del orden de dos a tres veces superior al Argón, para mantener la misma protección al arco eléctrico. Su energía de ionización es superior a la del Argón, 24,6 eV, lo que dificulta el cebado y la estabilidad del arco, pero por el contrario para igualdad de intensidades en el soldeo tiene una mayor aportación de energía.

Debido a que la conductividad térmica es mayor que la del Argón, se produce una distribución de temperaturas en el arco homogénea, generando cordones más anchos y una penetración uniforme. Como las pérdidas energéticas son mayores que en el caso del Argón, debido a las pérdidas por radiación, las penetraciones en la soldadura también son menores que en el caso del Argón.

5.11.2.4. Electrodo no consumibles

En la soldadura TIG, la función del electrodo es la de mantener el arco, sin la aportación de material al baño de fusión. Debe de tener una temperatura de fusión elevada para evitar su desgaste. En el caso de emplear corriente continua se recomienda conectar el electrodo al polo negativo, ya que de esta forma la temperatura en el extremo es menor, que en el caso de que se conectara al polo positivo. Se fabrican

mediante varillas que son obtenidas comprimiendo y sinterizando polvo metálico a altas temperaturas. Los diámetros que se ofrecen son 1-1,6-2-2,4-3,2-4-4,8-5 y 6,4 mm a nivel comercial, con una longitud estándar de 150 mm.

5.11.2.5. Tipos de electrodos no consumibles

En la soldadura TIG los electrodos que se emplean son: tungsteno puro, tungsteno aleado con circonio, tungsteno con torio y tungsteno aleado con lantano o cerio.

- Tungsteno puro: Es empleado el tungsteno o wolframio puro, cuyo punto de fusión es del orden de 3.400 °C, con un potencial de ionización de 4,5 eV. Para este tipo de electrodo se hace necesario que el extremo o punta del mismo sea redondeada. Principalmente se emplea con corriente alterna, para las soldaduras de aluminio y aleaciones.
- Tungsteno aleado con circonio: El tungsteno en este caso es aditivado con óxido de circonio (ZrO_2), cuyo punto de fusión ronda los 3.800 °C. Se utiliza tanto para corriente alterna o corriente continua, en la soldadura de materiales ligeros.
- Tungsteno aleado con torio: El tungsteno esta aditivado con óxido de torio (ThO_2), teniendo una temperatura de fusión del orden de 4.000 °C, con un potencial de ionización de 3,35 eV. Para este tipo de electrodo el extremo es recomendable que sea afilado y se emplea corriente continua en la soldadura. Especial hincapié en la naturaleza radioactiva del Torio.
- Tungsteno aleado con lantano o cerio: En este tipo de electrodos se emplea el tungsteno aditivado con óxidos de lantano (LaO_2) y de cerio (CeO_2), como resultado del desarrollo de nuevos electrodos que puedan sustituir a los que contienen torio, por su naturaleza radioactiva.

Para los electrodos no consumibles se emplean las especificaciones de la American Welding Society, AWS-A5.12 y la Euro Norma EN-26.848.

5.11.2.6. Acabado del extremo

El extremo de los electrodos y su forma o afilado condiciona en medida la estabilidad del arco eléctrico y consecuencia la soldadura. Por lo general, se recomienda que el electrodo sea lo más fino posible, para que de esta forma el arco se concentre más y el baño de fusión sea reducido. En la figura 5.19 se representan varias formas para el extremo del electrodo.



Figura 5.19: Influencia de la forma del afilado en la calidad de la soldadura. [13]

5.11.2.7. Selección del tipo de corriente

En el proceso de soldadura TIG es posible emplear corriente alterna y corriente continua. Según el material que se tenga que soldar, habrá que realizar una selección del tipo de corriente a utilizar y su polaridad. A continuación se detallan algunas características de ambos tipos de corriente.

- Arco en corriente continua: Cuando se emplea polaridad directa, que resulta ser cuando el electrodo está conectado al polo negativo, la energía del arco eléctrico en gran parte se concentra en la pieza, con lo que el rendimiento térmico que se consigue es aceptable, al igual que se consigue una buena penetración. En esta configuración el electrodo puede soportar hasta 8 veces más de intensidad que si estuviese conectado al polo positivo, sin tener problemas de que se funda o deteriore.

En el caso de emplear la polaridad inversa, esto es cuando el electrodo está conectado al polo positivo, la energía del arco eléctrico se distribuye de forma menos eficiente, haciendo que el baño de soldadura sea más ancho, que tenga una menor penetración y que haya una excesiva acumulación de calor en el electrodo, la cual genera un sobrecalentamiento y deterioro del mismo, incluso cuando se emplean intensidades de corriente menores. Con lo que, se recomienda la polaridad directa en corriente continua. Cabe destacar, que para soldaduras de aleaciones ligeras de Al y Mg, es prácticamente imposible el uso de la polaridad directa, debido a la formación óxidos refractarios en la superficie del baño. En la figura 5.20 se indican las características en función de la corriente y la polaridad.

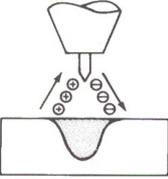
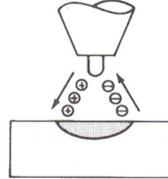
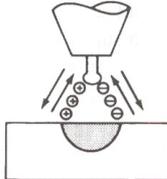
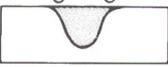
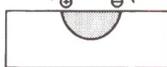
Tipo de corriente	Corriente continua	Corriente continua	Corriente alterna
Polaridad	Directa	Inversa	
Flujo de electrones e iones			
Aspecto de la penetraci3n			
Acci3n decapantes	No	Si	Si. Una vez durante el semiciclo positivo
Balace cal3rico (aproximado)	70% en la pieza 30% en la punta del electrodo	30% en la pieza 70% en la punta del electrodo	50% en la pieza. 50% en la punta del electrodo
Penetraci3n	Profunda y estrecha	Ancha y menos profunda	Media
Comportamiento del electrodo	Excelente. Ej. 400 A; 3,2 mm	Pobre Ej. 30 A; 3,2 mm	Buena Ej. 225 A; 3,2 mm

Figura 5.20: Características en la soldadura en funci3n del tipo de corriente y polaridad. [14]

- Arco en corriente alterna: Engloba las ventajas de ambas polaridades en corriente continua, figura 5.19, tiene un comportamiento bueno en el transcurso del semiciclo de polaridad directa, mientras que en el semiciclo de polaridad inversa tiene un efecto decapante en el baño de soldadura. Suele emplearse para las soldaduras de aleaciones ligeras, teniendo como inconvenientes el cebado del arco el3ctrico y su estabilidad. Por este motivo requiere de un equipo generador de alta frecuencia.

5.11.2.8. Equipamiento del equipo soldadura TIG

El equipamiento normal de un equipo de soldadura TIG est3 compuesto por los siguientes elementos: un generador de corriente alterna o continua que a su vez incorpora (un amper3metro, un volt3metro, regulador de corriente, un cable conductor de retorno de corriente, interruptor de pedal, antorcha TIG), botella de gas, regulador de presi3n, caudal3metro, manguera de suministro de gas, abrazadera. En la figura 5.21 se muestra como es la configuraci3n de los elementos que componen un equipo de soldadura TIG y en la figura 5.22 se representan diferentes tipos de portaelectrodos o antorchas.



Figura 5.21: Conjunto de elementos que componen un equipo de soldadura TIG. [15]



Figura 5.22: Diferentes tipos de portaelectrodos o antorchas en la soldadura TIG. [15]

5.11.2.9. Ventajas y limitaciones del proceso TIG (GTAW)

Debido a que el proceso de soldadura TIG proporciona soldaduras de gran calidad y pureza metalúrgica, con un buen acabado superficial, hace que sea idóneo su uso en las soldaduras empleadas en la industria del petróleo, química, petroquímica, alimentación, generación de energía, etc. Por su baja tasa de deposición no resulta ser una soldadura económica para emplear en espesores superiores a los 6-8 mm, por lo que sí es empleada en la primera pasada o cordón base, para posteriormente emplear un método más económico y productivo. En la tabla 5.4 se indican las principales ventajas y limitaciones a nivel resumen.

Ventajas	Limitaciones
El arco es visible	Tasa de deposición muy baja
No existen humos ni proyecciones	El alcance de las penetraciones se limita a milímetros
No hay escorias	Requiere de ambientes tranquilos
Se puede automatizar	La radiación ultravioleta produce ozono
Amplia gama de materiales de aporte	-

Tabla 5.4: Principales ventajas y limitaciones en la soldadura TIG. [11]

5.11.2.10. Soldadura Plasma Arc Welding (PAW)

Dentro de la soldadura TIG existe un desarrollo de la misma llamado, soldadura por arco de plasma, Plasma Arc Welding (PAW), ya que esta utiliza los mismos principios de funcionamiento que la soldadura TIG. Inicialmente su uso estaba destinado al corte de metales y menos a la soldadura. La soldadura PAW trabaja en rangos energéticos y de temperatura, mayores a la soldadura TIG, debido al empleo de plasma que es el siguiente estado que alcanza un gas, cuando este es calentado a suficiente temperatura como para que se ionice.

La energía para conseguir la ionización es proporcionada por el arco eléctrico, entre el electrodo de tungsteno y el metal base, conocido como arco transferido, o entre el electrodo y la boquilla, como arco no transferido. En la figura 5.23 se muestra esquemáticamente el portaelectrodo en la soldadura con plasma.

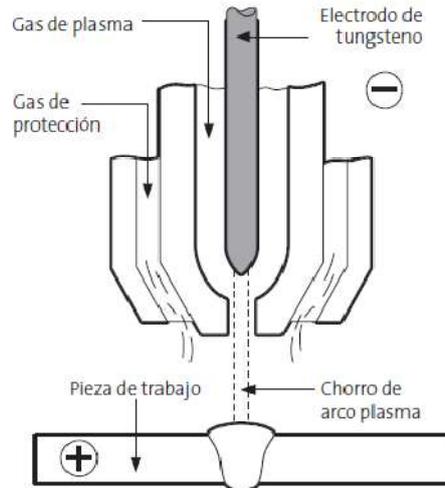


Figura 5.23: Ilustración esquemática de portaelectrodo para la soldadura con plasma. [15]

Como se puede comprobar en la figura 5.23, el chorro de arco plasma está rodeado por un gas de protección. El estado de plasma se alcanza cuando el gas atraviesa el orificio de la boquilla, en cuyo estado el gas experimenta una gran expansión y su consecuente aumento de velocidad. En la soldadura TIG las temperaturas son del orden de 11.000 °C, por el contrario en la soldadura PAW las temperaturas en el centro del chorro de plasma son del orden de los 28.000 °C.

Debido a que el gas de plasma no tiene capacidad de proteger al arco, al baño de fusión y el material expuesto al calentamiento, de la atmosfera, se requiere de un segundo gas, llamado gas de protección que circula a través de la pistola o portaelectrodo. A continuación se detallan las analogías y diferencias entre el proceso PAW y TIG (GTAW), en la tabla 5.5:

GTAW	PAW
*Distribución cónica del gas.	*Distribución cilíndrica del gas.
*Ancho impacto térmico en la pieza.	*Estrecho impacto térmico en la pieza.
*Sensible a cambios de longitud de arco, lo que se traduce en cambios en la energía aportada.	*Menos sensible a cambios en la longitud del arco.
*El electrodo sobresale de la boquilla con riesgo de contaminación, con el metal de aporte y con el baño de fusión.	*Mejor control energético.
*El arco puede ser desviado por campos magnéticos.	*El electrodo se encuentra dentro de la boquilla.
*La temperatura del orden de 11.000 °C.	*Mayor estabilidad direccional.
	*La temperatura del plasma es del orden de 28.000 °C.
	*Caudales: gas plasmágeno 1,5-15 l/min gas protección 10-30 l/min

Tabla 5.5: Cuadro analogías y diferencias entre PAW y TIG (GTAW). [11]

5.11.3. Soldadura por arco bajo gas protector con electrodo consumible (GMAW)

La soldadura por arco bajo gas protector con electrodo consumible, Gas Metal Arc Welding (GMAW), el arco se establece entre un electrodo de hilo continuo y el metal de la pieza a soldar, protegidos de la atmósfera a través de una gas inerte, se denomina proceso Metal Inert Gas (MIG), o protegidos mediante un gas activo, se denomina proceso Metal Active Gas (MAG). El proceso de soldadura GMAW puede ser realizado de tres formas:

Semiautomático, donde existe una regulación previa de la tensión del arco, velocidad de alimentación del hilo, intensidad de la soldadura y el caudal de gas. El arrastre de la pistola de la soldadura es realizado de forma manual.

Automático, tanto la regulación como la aplicación son realizadas de forma previa y automática.

Robotizado, en este punto todo es automatizado, mediante programación de robots de soldadura. El proceso de soldadura GMAW es uno de los más robotizados en la industria.

En la figura 5.24 se presenta esquemáticamente el proceso de soldadura GMAW:

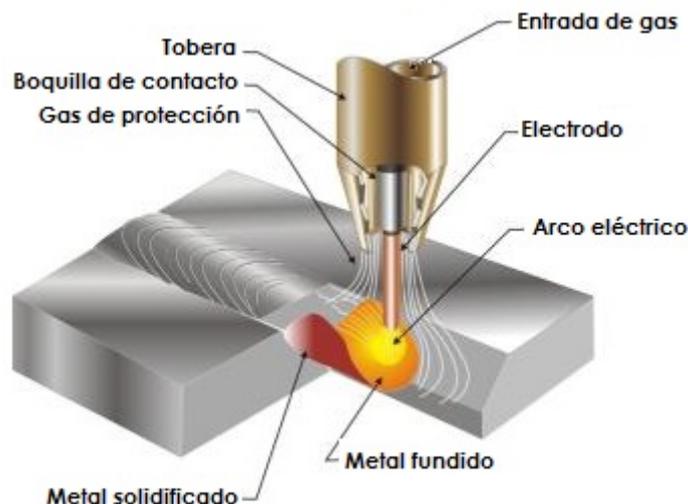


Figura 5.24: Principio del proceso de la soldadura (GMAW). [17]

5.11.3.1. Influencia de los parámetros

La polaridad normalmente empleada es la polaridad inversa, es decir, el electrodo está conectado a polo positivo, con la excepción de la soldadura con alambres

tubulares autoprottegidos, que en tal caso se utiliza la polaridad directa. La polaridad repercute en el modo de transferencia, la penetración, etc. En la figura 5.25 se representa la influencia de la polaridad en la penetración de la soldadura

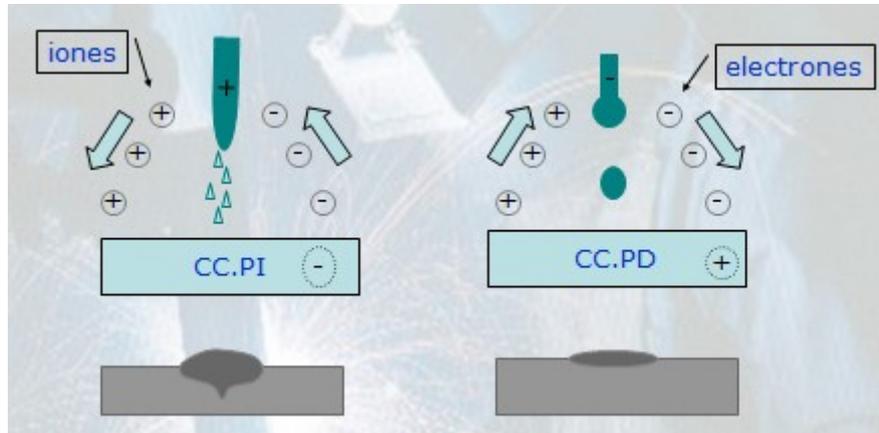


Figura 5.25: Influencia de la polaridad en la penetración de la soldadura (GMAW). [18]

En este proceso de soldadura la tensión de arco puede ser regulada según las necesidades de la soldadura, siendo determinante la manera en la se transfiere el metal fundido al baño de fusión. La velocidad de alimentación al hilo es la que a través de la autorregulación la que determina la intensidad de la soldadura. La naturaleza del gas empleado en la soldadura, determina parámetros como la transferencia de metal, tipo de penetración, aspecto del cordón de soldadura, etc. En la figura 5.26 se muestra diferentes tipos de cordones y penetraciones según el gas empleado.

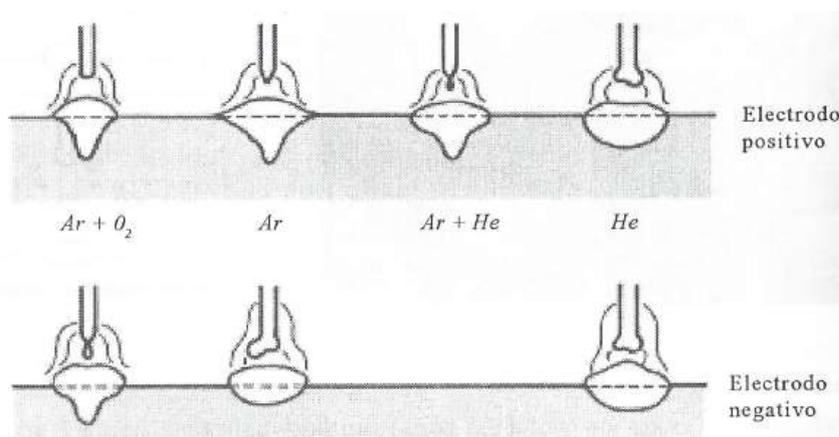


Figura 5.26: Tipos de cordones y penetraciones en función del gas empleado. [11]

5.11.3.2. Tipos de transferencia del metal

Existen cuatro tipos de transferencia de metal condicionados en gran medida por los parámetros, de polaridad, tensión del arco, intensidad de soldadura y gas empleado. Los tipos son los de arco (spray), arco corto o cortocircuito, arco pulsado y arco globular.

Arco (spray), es cuando se realiza la transferencia de metal a través de gotas muy finas. Siendo la pulverización del metal de forma ininterrumpida, con un arco estable y caracterizado por tener un cono de proyección muy luminoso, además de un zumbido característico. Al emplear la polaridad indirecta que a su vez tienen un efecto de limpieza sobre el baño de fusión, hace que sea recomendable para soldaduras en las que los metales produzcan óxidos. También se recomienda para la soldadura de espesores gruesos por su buena penetración, a pesar de que es difícil de controlar por el tamaño y fluidez del baño de fusión. El comportamiento del arco en estas condiciones está determinado por:

- Tensión de arco elevada
- Hilo conectado en polaridad inversa
- Elevada densidad de corriente
- Gas empleado debe ser Ar, Ar + O₂ ó Ar – CO₂

Arco corto o cortocircuito, en este caso sucede que el extremo del hilo se funde en forma de gota, la cual termina alargándose hasta hacer contacto con el metal base, siendo en este momento cuando se produce el cortocircuito y el aumento de la intensidad de corriente a valores elevados. Después se produce la separación de la gota del hilo, debido a las tensiones superficiales y simultáneamente se inicia de nuevo el arco eléctrico. Se emplea en pieza de poco espesor y aconsejable para soldadura en vertical, en cornisa y bajo techo. El comportamiento del arco está determinado por:

- Tensión de arco baja
- Hilo conectado en polaridad inversa
- Baja densidad de corriente
- Gas empleado debe ser CO₂ o mezclas Ar - CO₂

Arco pulsado, es una variante del sistema de transferencia (spray), donde el arco eléctrico se consigue a través de equipos de soldadura especiales que emplean generadores de frecuencia en el rango 50-100Hz. La superposición de dos corrientes, una primera que es ininterrumpida y de poca intensidad, para proporcionar la energía mínima necesaria para realizar la fusión, conocida como *base*. La segunda corriente está formada por una sucesión de pulsaciones con la misma frecuencia, donde en cada

pulsación realizada y solo en ella, se incrementa el valor de intensidad y se proyecta una gota de metal, conocida como *pico*.

Arco globular, este tipo de transferencia es cuando se funde el extremo del hilo, en forma de gotas gruesas que finalmente acaban desprendiéndose del hilo y con un movimiento oscilatorio de derecha a izquierda. Por lo que la transferencia de metal es difícil, el arco es inestable, poca penetración y las proyecciones son numerosas. Por todo esto no es recomendable su uso. Este tipo de arco se produce cuando:

- Hilo conectado polaridad directa
- La tensión está en valores de arco corto entre 22-24 V y valores de arco (spray) entre 27-28 V.

5.11.3.3. Productos de aporte (hilos)

En la soldadura GMAW, la configuración del electrodo es mediante hilo continuo, donde este puede ser macizo o tubular. Para el caso de **hilos macizos** los diámetros comerciales que son empleados son 0,6-0,8-1,0-1,2-1,6 mm, donde se puede alcanzar la medida de 2,4 mm, cuando se emplean intensidades elevadas. El formato de presentación, es por arrollados al azar o por capas, en bobinas que van desde los 15 kg hasta 500 kg, en función de la automatización que exista. Tiene un recubrimiento de cobre el hilo, para la función de contacto eléctrico con la boquilla, reducción de rozamiento y protección de la oxidación. La composición es similar a la del metal base y su elección está condicionada a la naturaleza del gas protector empleado.

Los **hilos tubulares** forman parte del proceso Flux Core Arc Welding (FCAW), el cual es empleado para resolver el problema de utilizar hilo macizo en posición vertical ascendente, debido a que este se descuelga a causa de la gravedad y por el propio tamaño del baño de fusión. El flux presente en estos tipos de hilos queda protegido por el propio metal de aporte. Los gases normalmente empleados son el CO₂ y las mezclas de Ar-CO₂. Las pistolas tienen refrigeración por agua y aspiración de los gases generados durante el proceso de soldadura.

En el caso de los hilos tubulares, la distribución de la intensidad eléctrica se realiza en la superficie del hilo, lo que crea una mayor densidad de corriente eléctrica que hace posible, que la velocidad de alimentación del hilo sea mayor y que tenga una tasa de deposición entre un 20-30% superior, que en el caso de hilo macizo y de igual diámetro. La hilos tubulares se clasifican en rutilos, básicos, rellenos de polvo metálico y autoprotectidos.

Rutilos

La composición del flux está formada por TiO_2 y SiO_2 . El metal fundido tiene un contenido en O elevado, consiguiendo un buen mojado con el metal base. La escoria proporcionada por el rutilo es de enfriamiento rápido, que facilita el control de la soldadura en la posición vertical ascendente. El hilo se conecta al polo positivo y para mejorar la tenacidad se suele añadir Ni al flux.

Básicos

La composición del flux está formada por CO_3Ca y F_2Ca , pudiendo contener C, Mn, Ni y Mo, para poder mejorar las características mecánicas y la tenacidad. Su contenido en O es escaso y en consecuencia tiene un mal mojado con el metal base. La escoria es fina, fluida y de color marrón. Se consigue una transferencia más basta y con mayores salpicaduras. El hilo puede estar conectado tanto al polo positivo, como negativo.

Rellenos de polvo metálico (Metal Core Arc Welding)

Para estos hilos el polvo metálico empleado para el relleno es de Fe, Ni, Mo, V o Cr, acompañado de elementos desoxidantes, con otros estabilizadores del arco. Apenas genera escoria debido a los pocos elementos generadores de la misma. También puede emplearse con arco corto, spray y pulsado. Se denominan de gran rendimiento aquellos que contienen polvo de hierro. El hilo puede ser conectado tanto al positivo como el negativo, aunque mayormente se emplea la conexión al negativo. Pueden emplearse con corriente alterna. Tienen una tasa de deposición que alcanza los 6 kg/h para la pasada raíz. Cuando los elementos de aleación hacen el trefilado de los hilos macizos, resultan ser la única solución a emplear.

Autoprotegidos (Shelf Shield Flux Core Arc Welding, SS-FCAW)

Para estos hilos no es necesario emplear gas protector, debido a que el flux contiene además de polvo metálico, otras sustancias que generan una barrera de gas que protege el baño. Por este motivo, se consigue liberar de peso a la pistola, al eliminar la parte gaseosa. El electrodo está conectado al polo negativo, ya que de esta forma el balance térmico es favorable para la formación de la atmósfera protectora.

5.11.3.4. Gases de protección

Los gases de protección son de vital importancia, ya que dependiendo de su composición influyen notoriamente en:

- Cantidad de energía aportada
- Tipo de transferencia
- Penetración
- Velocidad de soldeo
- Aspecto del cordón
- Probabilidad de proyecciones y mordeduras

A continuación se exponen los gases de protección en función de las dos modalidades de la soldadura GMAW, como son la TIG/MAG.

Soldadura MIG

En esta soldadura es gas empleado es un gas inerte que no reacciona con el arco. Existen varios gases inertes como el argón, helio, neón, criptón, xenón y el radón, siendo de todos ellos el más empleado el Ar en Europa y el He en Estados Unidos.

Ar

El argón es empleado solamente en la soldadura de Al, Cu, Ni y Ti. Empleado en el acero produce mordeduras y cordones irregulares, que por su forma provocan la falta de penetración en la raíz.

Ar + O₂

El O₂ mejora la capacidad de mojado, al actuar sobre la tensión superficial de la gota y mejora también la penetración. Reduce la tendencia a realizar mordeduras. La propiedad de inerte no se pierde hasta valores de O₂ del 5%, en su adición.

He

En comparación con el Ar, genera cordones más anchos y con menor penetración.

Soldadura MAG

En esta soldadura el gas empleado es activo y si que tiene cierta influencia sobre el arco.

CO₂

Es un gas incoloro, inodoro y que tiene un sabor picante, siendo más pesado que el aire. Su obtención es a través de la combustión de compuestos del carbono, con exceso de aire ó O₂. Tiene un carácter oxidante, que sumada a la temperatura elevada del arco, este tiende a disociarse. El O₂ de la disociación es activo y al combinarse con

el C del acero genera más CO, que provoca que el contenido de C en el acero sea bajo si no se emplea un hilo con el contenido adecuado de C, conjuntamente con elementos desoxidantes como Si y Mn. En los aceros al Cr-Mo no debe emplearse porque existe el riesgo de oxidación del Cr, en el metal base y en el hilo aportado. Tampoco debe ser empleado en aceros inoxidable austeníticos, ya que promueve la formación de carburos de cromo, $Cr_{23}C_6$, con la correspondiente pérdida de resistencia a la corrosión. Para que las soldaduras estén exentas de porosidades es necesario que la pureza del CO_2 sea superior al 99,85%, con contenidos de N_2 y H_2 inferiores al 0,05%.

En la soldadura de acero al carbono es el único gas que puede emplearse de forma individual para la atmósfera protectora. Se consiguen penetraciones más profundas y anchas en el cordón. Debido a que los arcos que produce son muy energéticos, aumenta el número de proyecciones.

Ar + CO₂

Estas mezclas pueden ser con proporciones que van desde el 15% al 25%, para el soldeo de aceros al carbono y de baja aleación. Algunas ventajas que se obtienen con este gas son:

- Mejor visibilidad del baño
- Arco suave
- Baño de fusión más frío
- Aspecto del cordón mejorado
- Menor número de proyecciones
- Mayor regulación

Como posible inconveniente estaría el coste económico de la mezcla, pero también hay que considerar cuanto supone este coste sobre el total de la soldadura, en relación a las prestaciones mecánicas que se obtienen de la misma.

O₂

Este gas está presente en la atmósfera entorno al 21% en volumen, es diatómico, incoloro, inodoro e insípido. Su obtención es mediante destilación fraccionada del aire líquido, aunque también se puede obtener por medio de la electrólisis del agua. Es un gas oxidante, el cual produce reacciones exotérmicas cuando se combina con otros elementos y es considerado como el comburente más importante. En el caso del P, Na y Mg se inflaman espontáneamente con el aire. Su efecto en la soldadura es el de aumentar la producción de escorias en la superficie del baño de fusión, al mismo tiempo que reduce la tensión superficial. Es contradictorio que sea empleado el O_2 como gas de

protección, cuando precisamente la función del gas de protección es la de proteger el baño de metal del oxígeno de la atmósfera. Esto es posible ya que las cantidades de O₂ empleadas como gas de protección, son muy pequeñas y el tiempo de duración a la exposición del gas, es tan pequeño que no da tiempo a que se generen reacciones del oxígeno con el acero. Cabe destacar que mezclado con Ar mejora la estabilidad del arco en el caso de la soldadura MIG, mejora la velocidad de transferencia, la forma y la penetración.

H₂

También resulta ser un gas diatómico, incoloro, inodoro e insípido. Su peso en comparación con el oxígeno es de 14 veces inferior. Es un gas activo que favorece la eliminación de óxidos, ya que tiene un carácter reductor. Puede provocar la fisuración en frío en los aceros ferríticos, debido a su carácter fragilizante. Por lo que se consideran buenos materiales de aporte, aquellos que tienen un contenido de limitado de H difusible. Se puede utilizar en la soldadura de aceros inoxidable austeníticos y con mezclas de hasta el 10% de Ar ó He, consigue una mejor penetración y mayor velocidad de soldadura y corte.

N₂

Su presencia en la atmósfera es del orden del 78% en volumen y su obtención es a través de la destilación fraccionada del aire líquido. Aunque no es un gas tóxico, en determinados sitios donde se pueda producir un desplazamiento del aire, puede darse el caso de asfixia (falta de oxígeno) debido a que es un gas más ligero que el aire. Es un gas muy inactivo, en el que a la temperatura de 3.500 °C sólo el 5% de las moléculas de N₂ están dissociadas en sus átomos. Solo se convierte en un gas activo, cuando alcanza elevadas temperaturas como las que se presentan en el arco eléctrico, y en este caso pasa a formar Fe₄N que produce la reducción de la ductilidad del acero. Su uso se limita principalmente al corte y mínimamente en soldadura.

5.11.3.5. Especificaciones

Las especificaciones para hilos macizos según la American Welding Society y las Euro Normas, en electrodos para acero inoxidable son: AWS-A5.9 y EN-12.072. Los electrodos macizos empleados en los aceros inoxidables se clasifican según composición química y propiedades mecánicas, con aceros cuyo contenido de Cr es superior al 4% y el Ni no excede el 50% de la aleación. En el caso de hilos tubulares y electrodos para aceros inoxidables, las especificaciones son AWS-A5.22 y EN-12.073. En estos último la clasificación se realiza por la composición química y tipo de gas de protección.

5.11.3.6. Instalación soldadura GMAW

A continuació se detalla la composició de un equip de soldadura GMAW, en la figura 5.27:

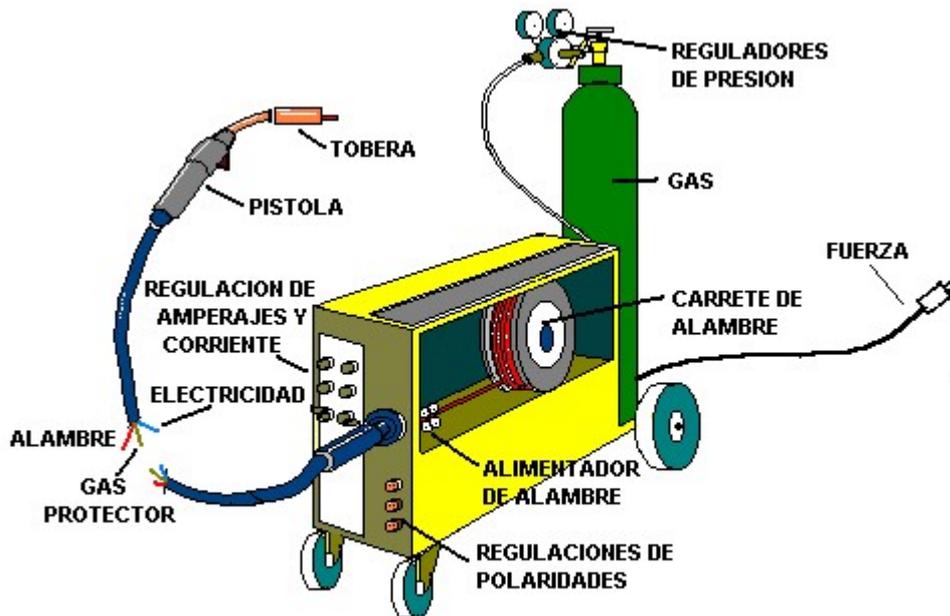


Figura 5.27: Esquema de los elementos que conforman un equipo de soldadura (GMAW). [19]

- Generador: Es un equipo de corriente continua donde se realiza la regulación de polaridad y de corriente. El equipo es de potencial constante.
- Alimentación del hilo: Existen dos posibilidades, independiente al generador o integrada en el mismo. El sistema está motorizado para realizar el avance del hilo. En otros casos puede existir un pequeño sistema motorizado de arrastre del hilo, que está incorporado en la propia pistola, que se denomina “push-pull”.
- Circuito de gas protector.
- Circuito de refrigeración, en el caso de que sea necesario.
- Pistola de soldadura.
- Conjunto de válvulas y órganos de reglaje y control.

En la figura 5.28 se muestran algunos de los tipos de pistola que son utilizadas en la soldadura GMAW.



Figura 5.28: Diferentes tipos de pistolas empleadas en la soldadura (GMAW). [20]

5.11.3.7. Ventajas y limitaciones del proceso GMAW

Se indica a continuación en la tabla 5.6 las principales ventajas y limitaciones para el proceso de soldadura GMAW.

Ventajas	Limitaciones
<ul style="list-style-type: none"> *Alta tasa de deposición. *Elevado factor de marcha. *Admite altas densidades de corriente. *Alimentación del hilo automática. *Fácil regulación. *Presencia de escoria casi nula, excepto con hilos tubulares. *Fácil manejo. *Versátil para muchos materiales. *Puede soldar en todas las posiciones. 	<ul style="list-style-type: none"> *Riego de falta de fusión y porosidad. *Limitación en el empleo de materiales de aporte para hilos macizos, por la dificultad del trefilado y arrollado del hilo. *En función del modo de transferencia, produce humos y proyecciones. *Menos movilidad que en la soldadura SMAW. *Ambientes tranquilos, menos para los hilos autoprottegidos.

Tabla 5.6: Principales ventajas y limitaciones en la soldadura GTAW. [11]

5.11.3.8. Defectos en la soldadura GMAW y causas

En la operación de la soldadura se pueden producir errores, que pueden provocar fallos. A continuación se indican en la figura 5.29, algunos de estos fallos y sus causas:

Poros por caudal incorrecto de gas: Arco corto: 20l/min. Arco spray: 30l/min. 10l/min 15l/min. 5l/min 8l/min

mal bien mal

Poros debidos a mantener la pistola en posición incorrecta:

mal bien bien

Poros por ajuste incorrecto del tubo de contacto

arco corto arco spray arco spray

correcto para pasada de raíz y en posiciones forzadas correcto para posición de llenado y posición normal incorrecto

Poros producidos por tubo de contacto excéntrico

mal bien

fallos: el tubo de contacto es excéntrico. la flexión del alambre es demasiado fuerte.

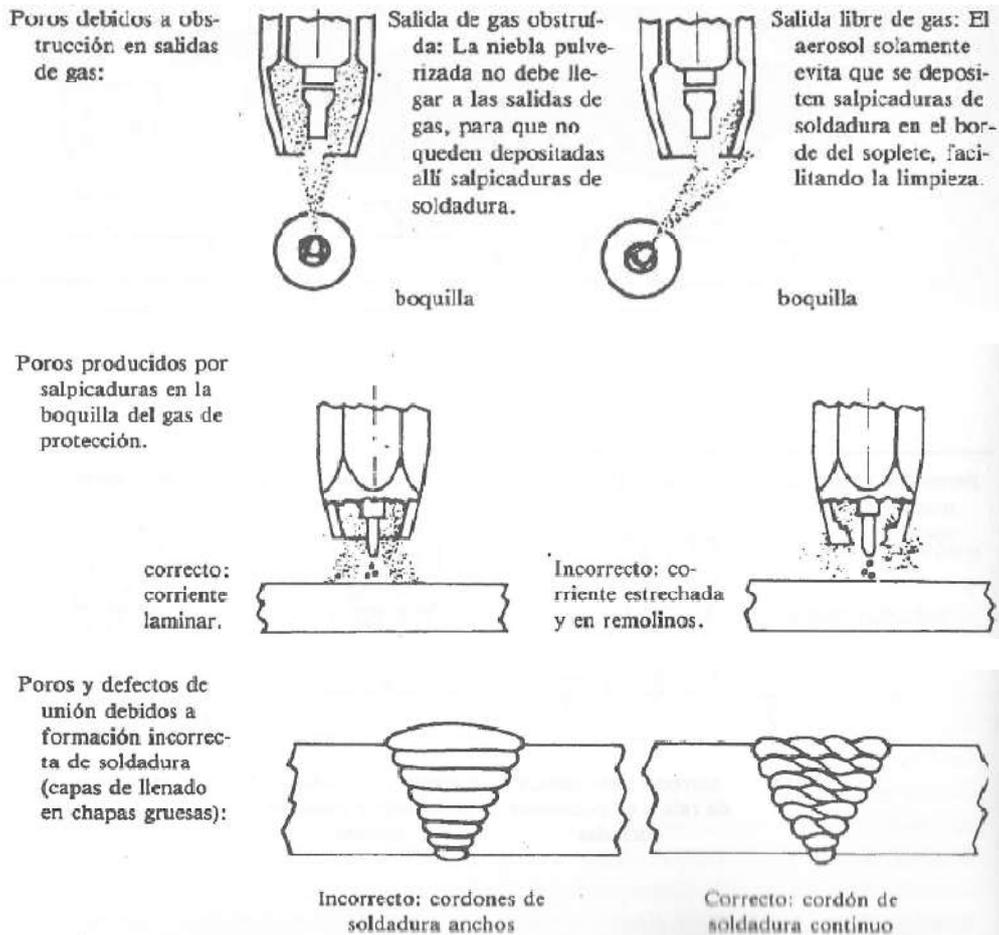


Figura 5.29: Defectos y causas en la operatoria de la soldadura GMAW. [11]

5.11.3.9. Selección del gas de protección

En la soldadura otro de los factores que es importante, es el coste económico de cada una de las partes que componen el proceso de soldadura. En el caso del coste del gas de protección, no es una partida importante en comparación con el resto. Por lo tanto, independientemente de la selección que se realice, no tendrá repercusión en el coste económico. El coste del gas de protección y de la corriente para procesos de soldadura de aceros al carbono y aceros inoxidables austeníticos es la misma, un 3% y 2% respectivamente. Representando el coste en la soldadura de acero al carbono, un 19% para el hilo y de un 76% para la mano de obra, y para la soldadura de acero inoxidable austenítico un 50% en el hilo y un 45% en la mano de obra.

6. Soldabilidad en los aceros inoxidable

6.1. Concepto de soldabilidad

La recomendación ISO 581/80 define la soldabilidad de la siguiente manera: “Un acero se considera soldable en un grado prefijado, por un procedimiento determinado y para una aplicación específica, cuando mediante una técnica adecuada se pueda conseguir la *continuidad metálica de la unión*, de tal manera que esta cumpla con las exigencias prescritas con respecto a sus propiedades locales y a su influencia en la construcción de la que forma parte integrante”.

6.2. Energía de aportación

La energía de aportación en los procesos de soldadura por arco eléctrico, tiene cierto interés práctico para la soldadura. Dicha energía se denomina energía bruta aportada o EBA, siendo su origen eléctrico. Para estos procesos la potencia eléctrica del arco es la que determina la cantidad de calor aportado. Donde la potencia del arco eléctrico es:

$$\text{Potencia del arco} = I(\text{Amperios}) * V(\text{Voltios}) = \text{Watios} = \text{Julios/segundo}$$

Aplicando el concepto a la soldadura, la EBA será:

$$EBA(\text{Julios}) = U * I * t$$

Donde:

U, tensión de la corriente de soldeo, en voltios.

I, intensidad de la corriente de soldeo, en amperios.

t, tiempo de fusión del electrodo, con aportación de calor, en segundos.

El tiempo de fusión del electrodo es función del diámetro, longitud y parámetros eléctricos empleados. Debido que el calor se distribuye según el avance del electrodo en la pieza, es más práctico hablar de energía por unidad de longitud de soldadura, cuya ecuación es:

$$EBA = \frac{U * I}{v}$$

Siendo, v la velocidad de avance de la soldadura en mm/segundo. En la industria es más habitual emplear la velocidad en cm/minutos y la energía de aportación en kJ/cm, con lo que la expresión quedaría de la siguiente manera:

$$EBA(kJ/cm) = \frac{U(V) * I(A) * 60}{v(cm/min) * 1000}$$

6.3. Balance térmico en los procesos de soldadura

En los procesos de soldadura analizados desde el punto de vista termodinámico, se observa que todo el calor generado por la fuente no se transmite a la pieza, por la existencia de pérdidas de calor. Se puede determinar que según el tipo de proceso empleado en la soldadura tiene una mayor relevancia en estas pérdidas de calor, al contrario que en la posición de soldadura, que no resulta ser tan importante cuantitativamente en estas pérdidas. A parte de la EBA, también existe la energía neta aportada (ENA), siendo la energía total que recibe la pieza. A partir de la EBA, existe un primer flujo de pérdidas de calor por procesos de conducción, convección y radiación, que dependen del proceso de soldadura empleado y de la posición de soldeo. Como resultado queda la energía neta aportada (ENA), que se divide en dos flujos de calor, un flujo de pérdidas de calor por conducción, que dependen del espesor del material, diseño de junta, conductividad del material y temperatura inicial. El segundo flujo de calor es el empleado en fundir el metal y que depende del calor específico del material y de la temperatura inicial.

6.4. Zonas características de la soldadura

En la zona de soldadura existen varias zonas que en función de las temperaturas a las que han sido sometidas, el metal base y del material aportado, tienen una importante influencia en las características mecánicas y su comportamiento frente a la corrosión. A continuación se indican las zonas existentes:

Metal base, es el material que no ha sido afectado por el proceso de soldadura, y mantiene la composición química y estructural originales.

Metal de soldadura, es el material fundido en el proceso de soldadura, donde la composición química y estructura son las obtenidas por la fusión del material de aporte y el metal base.

Zona afectada térmicamente (ZAT), es la zona de metal base que ha estado sometida a ciertas temperaturas durante un tiempo, donde se pueden haber realizado ciertas transformaciones estructurales.

En la figura 6.1 se muestra un esquema de las distintas zonas afectadas durante el proceso de soldadura.

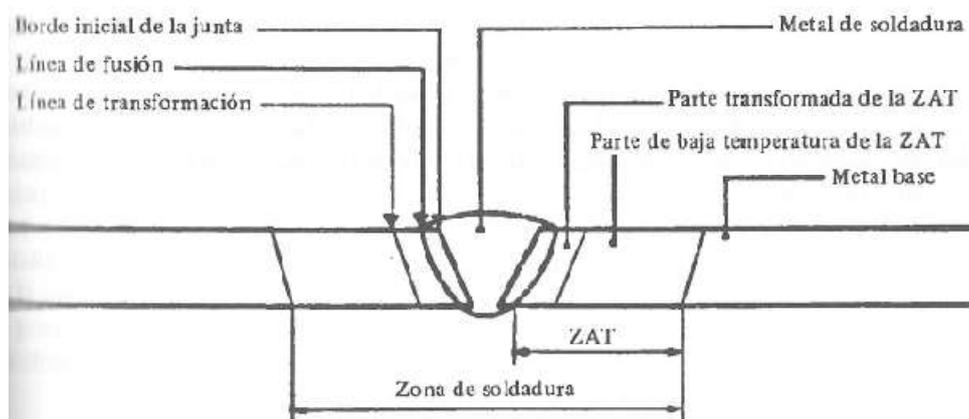


Figura 6.1: Distintas zonas afectadas por el proceso de soldadura. [11]

6.5. Zona afectada térmicamente

Los calentamientos que se generan por el proceso soldadura y sus efectos perjudiciales, no tiene que ser necesariamente en la zona de fusión, siendo en algunos casos la zonas colindantes a la zona de fusión donde se pueden desarrollar condiciones más desfavorables. Las transformaciones metalúrgicas que experimentan las zonas cercanas a la zona de fusión, dependen de la temperatura máxima que estas puedan alcanzar. En la figura 6.2 se indican los distintos cambios estructurales que sufren las distintas zonas afectadas térmicamente, en función de las temperaturas alcanzadas y para un enfriamiento lento. Para otras condiciones de enfriamiento se tendrá que recurrir a los diagramas TTT (Temperatura-Tiempo-Transformación).

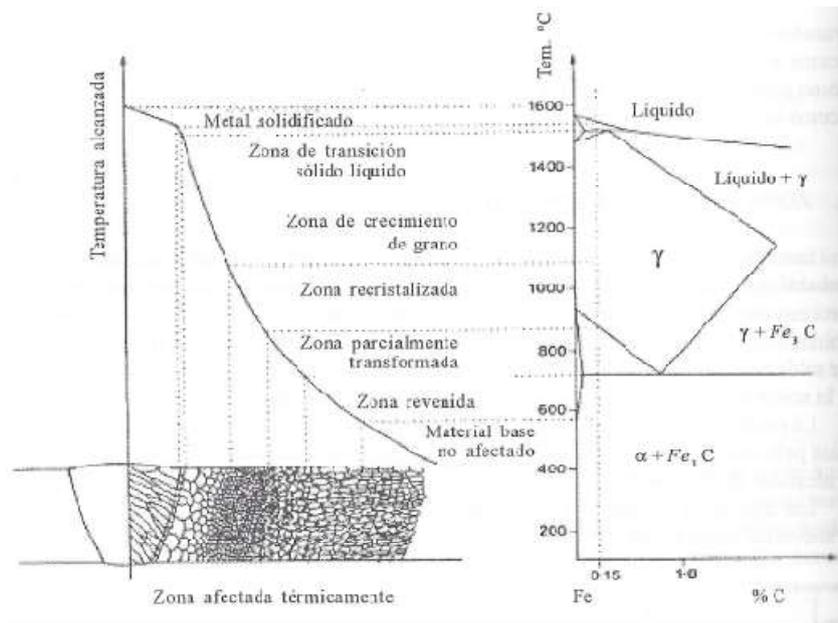


Figura 6.2: Diagrama esquemático de la zona afectada térmicamente y las sub-zonas derivadas indicadas sobre un diagrama Fe-Fe₃C. [11]

6.6. Velocidad de enfriamiento y dilución

La velocidad de enfriamiento es determinante para estimar cuales serán las características metalúrgicas y mecánicas de la unión soldada. Esto se consigue mediante termopares instalados en la soldadura, pudiendo medir el tiempo de enfriamiento entre el intervalo de 800 °C y 500 °C, denominado $t_{8/5}$.

La dilución se define como la proporción de metal base que por fusión del mismo interviene en la composición del cordón. Se puede emplear la dilución para determinar la cantidad de un elemento en el cordón, por su influencia en la composición química del mismo. Factores que pueden influir en la dilución, son el método de soldadura empleado, el cual determina el tipo de penetración conseguida, el diseño de la junta, el número de pasadas y el modo de realización de la soldadura. La dilución conseguida es mayor cuando se realiza un solo cordón, debido a una mayor zona de contacto entre el metal base y el aportado, por contra cuando se realizan varias pasadas la zona de contacto entre metal base y aportado, se ven reducidas.

6.7. Absorción de gases en el metal fundido

La absorción de gases en el metal fundido es un problema que afecta a la calidad de la soldadura y conlleva ciertos problemas. Los gases que más problemas pueden ocasionar son el oxígeno y nitrógeno, cuyo origen está en el aire y el hidrógeno, que procede de la humedad.

Oxígeno, resulta ser bastante activo y su acción se puede ver disminuida utilizando ciertos desoxidantes. En aceros, el Mn y Si absorben oxígeno formando MnO y SiO donde después se transfieren a la escoria. A la temperatura de la soldadura el oxígeno que queda libre interactúa con el carbono pasando a formar CO. Resulta ser un gas que cuando no tiene tiempo para evolucionar, pasa a ocluirse dentro del metal fundido generando porosidades esféricas.

Nitrógeno, la disolución de grandes cantidades de N son generadas por el acero fundido. Normalmente un exceso de N precipita en nitruros o permanece como N libre que tiene la posibilidad de provocar porosidades. Sin embargo los nitruros generan un aumento de la carga de rotura, la dureza y el límite elástico, pero por el contrario disminuyen la ductilidad, lo que a su vez pueden generar fisuras en el cordón o en la ZAT.

Hidrógeno, también en este caso el acero fundido tiene la capacidad de disolver grandes cantidades de H. Se pueden fisuras en el cordón debido al paso de austenita con carga de H a ferrita. En la absorción de hidrógeno se manifiesta un fenómeno llamado “ojos de pez”, que son como copos de color blanco que aparecen en la superficie de rotura.

6.8. Prealentamiento

Según la velocidad de enfriamiento la cual está determinada por varios factores como pérdidas por conducción, espesor de chapa, etc., puede influir en la estructura metalúrgica del acero, pasando de una estructura de austenita a martensita. Siendo la finalidad del prealentamiento la de reducir la diferencia de temperaturas entre la inicial y la temperatura de fusión del acero. Esta reducción en el salto de temperatura provoca que la curva de enfriamiento en el diagrama TTT, tenga un desplazamiento hacia la derecha, donde se alcanzan estructuras más blandas y con menor fragilidad, evitando de esta manera la aparición de fisuras. En consecuencia, se reducen las tensiones en la ZAT, facilita la difusión del hidrógeno y se disminuye la formación de poros.

La temperatura de prealentamiento es la temperatura que debe mantenerse en la pieza a soldar antes del inicio de la soldadura y que durante todo el proceso de soldadura se debe mantener. También se recomienda que la temperatura de prealentamiento se extienda más allá de la zona del cordón y en ambos lados del mismo. Esta se consigue por aplicación local de llama de gas o resistencia eléctrica. Su medición se realiza a través de termopares y cuando sea posible en la cara contraria a donde se aplica la fuente de calor.

6.9. Precipitados y fases intermetálicas

En el proceso de soldadura debido a que ciertas zonas están sometidas a ciertas temperaturas y un determinado tiempo, existe la posibilidad de que se produzcan fenómenos estructurales que más adelante pueden ocasionar problemas en el comportamiento en servicio. En este caso tenemos: precipitación de compuestos de elementos intersticiales y formación de fases intermetálicas.

▪ *Precipitación de compuestos de elementos intersticiales*

Los elementos intersticiales como el C y N, se combinan con algunos elementos como Cr, Ti y Nb, pasando a ser precipitados de carburos, nitruros y/o carbonitruros, localizándose principalmente en los bordes de grano. Dicha precipitación se forma debido al proceso de soldadura, que provoca que zonas del material inoxidable estén sometidas a temperaturas entre los 500 °C y 800 °C durante un determinado tiempo. Los precipitados se producen normalmente en el metal base y a una cierta distancia del cordón de soldadura, que a su vez provocan el empobrecimiento en Cr de las zonas próximas al borde de grano, cuando se combina con el C para formar carburos de cromo Cr_{23}C_6 , en este momento se dice que el material está “sensibilizado”. Esto genera una serie de problemas como son:

- Menor resistencia a la corrosión general, picaduras e intersticial.
- Presencia de corrosión intergranular.
- Menor ductilidad.
- Menor tenacidad y una mayor fragilidad.

Algunas de las soluciones que se pueden emplear son:

- ***Tratamiento térmico de solubilización:*** Este proceso consiste en calentar el acero hasta una temperatura de 1.025 – 1.120 °C, seguidamente realizar un enfriamiento lo más rápido posible, para que en el tramo de los 800 °C a 500 °C se realice con el menor tiempo posible y de esta forma evitar los precipitados de carburo.
- ***Selección de aceros con bajo contenido en carbono:*** Según un diagrama TTS, Temperatura-Tiempo-Sensibilización, a la corrosión intergranular para el acero inoxidable 304 y 316, donde se presentan diferentes contenidos de carbono y siendo el interior de las curvas zonas sensibles a dicha corrosión. Se puede observar las diferentes temperaturas donde se realiza la sensibilización con el menor tiempo para los dos materiales, siendo para el acero 304 a una temperatura de 600 °C y para el 316 a una temperatura de 725 °C.

También el rango de temperaturas de sensibilización para ambos materiales es distinta y a medida que el contenido en carbono es menor, aumenta

exponencialmente el tiempo de sensibilización. Para los aceros con contenidos inferiores al 0,030% se consideran que ya no son sensibles a la corrosión intergranular, pasando a denominarse 304L y 316L.

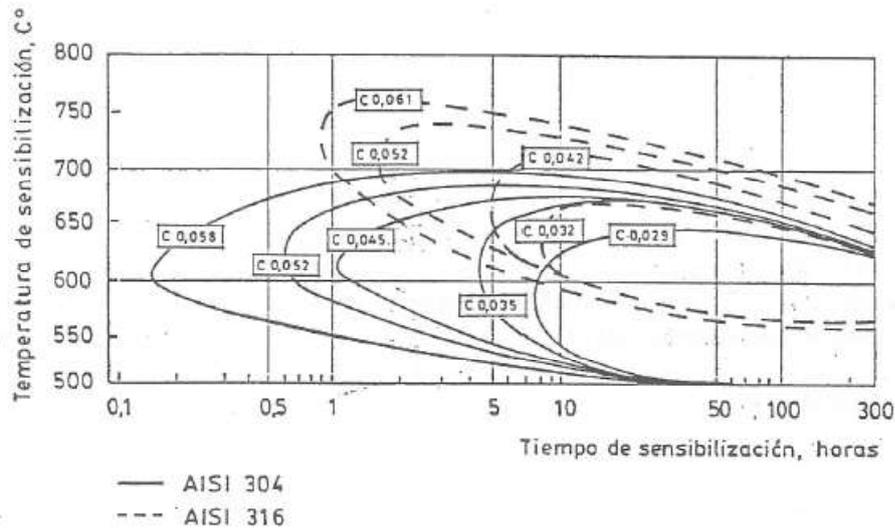


Figura 6.3: Curvas TTS de sensibilización a la corrosión intergranular de los aceros inoxidables AISI 304 Y AISI 316. [11]

- Selección de aceros inoxidables estabilizados:** La presencia de elementos como el Ti y el Nb, evitan la precipitación de carburos de cromo, pero contrariamente provocan corrosión intergranular junto al cordón. Estos provocan una disminución de la ductilidad y tenacidad del material, pero incrementando la resistencia a fluencia a alta temperatura. Aceros estabilizados son por ejemplo el AISI 321 cuyo contenido de Ti es cinco veces superior al de carbono y el AISI 347 cuyo contenido de Nb es diez veces superior al de carbono. Cabe destacar que estos aceros inoxidables estabilizados en el proceso de soldadura deben emplear materiales de aportación también estabilizados.
- Formación de fases intermetálicas**

La formación de fases intermetálicas, donde la más relevante es la fase sigma (σ), es generada por una exposición prolongada en un rango de temperaturas que están comprendidas entre 550 °C y los 900 °C, generando este fenómeno en los aceros inoxidables. La fase sigma resulta ser un compuesto cristalográfico, duro y frágil, donde los elementos ferritizantes ayudan a su formación. De forma básica es una fase Fe-Cr que contiene Mo con bastante frecuencia.

A partir de contenidos de cromo entorno al 17% se empieza a formar y con mayor facilidad a partir de la ferrita δ . Su aparición es posible en las juntas de

grano de metal sensibilizado como con cierta cantidad de ferrita presente en el metal de aporte austenítico. La cantidad de fase sigma es proporcional al tiempo de permanencia en el rango de temperaturas indicado, mayores contenidos de Cr y Mo del metal base y de soldadura, y de ferrita δ .

En los diagramas mostrados en las figuras 6.3 y 6.4 se indica la presencia de la fase sigma (σ) en los sistemas Fe-Cr y Fe-Cr-Ni. En los aceros dúplex donde son más propensos a este fenómeno por su estructura y mayor contenido de Cr, no tienden a precipitar durante la soldadura por la lenta velocidad de formación. Siendo su aparición exclusivamente en los tratamientos térmicos de larga duración a la temperatura de sensibilización o en el rango de temperaturas crítico que se realice la soldadura.

Algunos de los inconvenientes de la formación de fase sigma (σ) son:

- Menor resistencia a la corrosión por picaduras e intersticial.
- Corrosión intergranular medios nítricos y calientes.
- Aumento de la fragilidad y menor ductilidad.

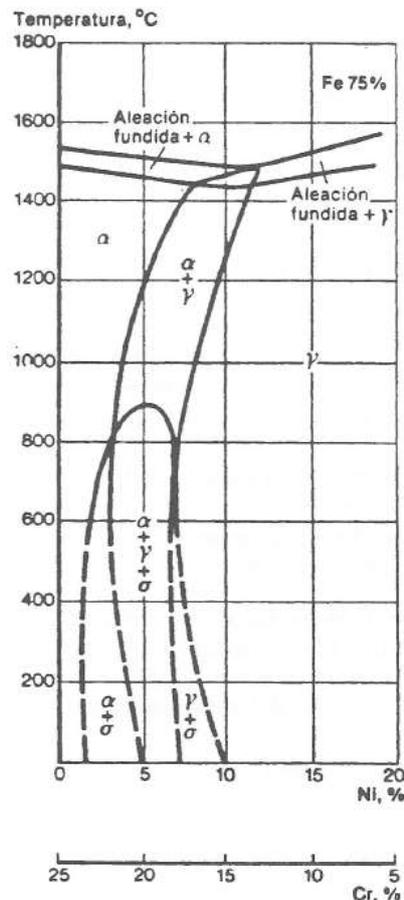


Figura 6.4: Diagrama de fases para el sistema Fe-Cr-Ni. [11]

6.10. Soldabilidad de los aceros inoxidable austeníticos

Este grupo de aceros inoxidable es uno de los más empleados a nivel industrial. Su soldabilidad se considera buena, ya que desde la temperatura de fusión hasta la temperatura ambiente, no presentan ninguna transformación de fase, e incluso tampoco hasta temperaturas muy bajas. Para la correcta operación de soldeo han de tenerse en cuenta algunos puntos que se detallan a continuación.

Propiedades físicas

Una de las propiedades físicas de los aceros inoxidable austeníticos, es que tienen un coeficiente de dilatación térmica alrededor de un 50% mayor que el de los aceros al carbono, con una conductividad térmica aproximadamente un 40% menor. Por esto mismo, las contracciones en la soldadura serán mayores y con posibilidad de generar deformaciones. Para poder minimizar las tensiones existen ciertas recomendaciones como: seleccionar el proceso adecuado para realizar un aporte de calor bajo; una planificación previa de las etapas de soldeo y efectuadas de forma simétrica, para que la distribución de calor sea lo más equilibrada posible. También debido a que su conductividad térmica es menor, la zona ZAT será más estrecha.

Selección del metal de aporte y del proceso de soldadura

Es importante la adecuada selección de los metales de aporte y de los procesos de soldadura. Existen tablas donde se recomiendan los materiales de aportación a emplear para los aceros inoxidable austeníticos más empleados. Para la elección del proceso de soldadura se pueden emplear los siguiente criterios: aporte y distribución del calor; operatividad; velocidad de soldeo; inconvenientes relacionados con la resistencia a corrosión del metal a depositar; disponibilidad comercial; coste.

Agrietamiento en caliente

Este tipo de agrietamiento es típico en estos aceros inoxidable austeníticos y son debidos a una acumulación de impurezas por segregaciones, que se dan en las últimas zonas de solidificación del metal de aporte. En dicha zonas se generan superficies débiles, que en algún momento pueden romperse y provocar grietas por las tensiones de contracción de la propia soldadura. Existen tres posibilidades para eliminar este tipo de agrietamiento:

- Reducción de las tensiones mecánicas
- Las impurezas que mayor influencia tienen en el agrietamiento en caliente son, S y P, aunque también hay otros elementos que influyen como Pb, Sn, Sb, Bi, Nb y el Si., pero los metales de aporte tienen contenidos menores de estos elementos y hace que resulte mejor su

empleo en el proceso de soldeo, a que no se empleen. El contenido de impurezas es inversamente proporcional al agrietamiento en caliente.

- Disminuir las segregaciones, para lo cual es necesario disponer de una cantidad determinada de ferrita en la matriz austenítica del metal.

Contenido de ferrita

Es primordial tener un contenido de ferrita óptimo en el metal de soldadura. En los casos concretos que no se requiera de un cordón exento de ferrita, puede ser un contenido óptimo valores entre el 5% y el 10%, aprovechado así las ventajas de su presencia y minimizando sus inconvenientes. La obtención de estos porcentajes óptimos se consigue por medio de la selección de los materiales de aportación, parámetros y proceso de soldeo. Algunos de los factores que intervienen en el contenido de ferrita del metal depositado son: operatorio del proceso; forma y solape cuando se realiza el depósito; velocidad de enfriamiento del cordón; parámetros de soldeo y el grado de dilución.

Precaentamiento – tratamiento térmico

Normalmente los aceros inoxidable austeníticos no requieren de un precaentamiento, ni de un tratamiento térmico. Solo por razones de reducción de tensiones o por cierto riesgo de agrietamiento por corrosión bajo tensiones, se realiza un tratamiento térmico. El tratamiento empleado para la reducción de tensiones es el de solubilización a 1.000 – 1.100 °C, seguido de un enfriamiento rápido en agua, es cual es complicado de realizar por motivos prácticos. En el caso de no poder realizarse, se empleará un rango de temperaturas entre 850 – 950 °C.

6.11. Soldabilidad de los aceros inoxidables ferríticos

La soldabilidad en los aceros inoxidables ferríticos no resulta ser tan buena como en los austeníticos, ya que en el proceso de soldeo se presentan bastantes complicaciones y variaciones estructurales en las zonas de soldadura. Algunos fenómenos que se presentan en la zona afectada térmicamente son:

- **Crecimiento de grano:** merma la tenacidad con la complicación de que no es recuperable por tratamiento térmico.
- **Precipitación de carburos:** merma la tenacidad y también reduce la resistencia a la corrosión en aquellos aceros estabilizados con Ti o Nb. Posibilidad de corrosión intergranular.
- **Transformación de fases:** reduce la resistencia a tracción y al impacto. En aceros donde el contenido de cromo es inferior al 20%, la austenita

durante el enfriamiento pasa a convertirse en martensita. Esto introduce tensiones que pueden desencadenar en fallo cuando el material esta en servicio. La formación de fase sigma disminuye la tenacidad por la conocida fragilización de los 475 °C, debido al excesivo tiempo de permanencia entre las temperaturas de 450 °C a 550 °C.

Con bajas aportaciones de calor y con un precalentamiento entre 200 °C y 400 °C, se pueden obtener soldaduras buenas para los aceros inoxidable ferríticos. Después del soldeo se debe tratar térmicamente entre 750 °C a 850 °C, con una duración de 30-60 minutos, excepto en los casos en que tenga que trabajar a alta temperatura. De esta forma se consigue disolver los carburos precipitados, disminuir las tensiones de soldeo y de contracción, mejorar la tenacidad y aumentar la resistencia a la corrosión. Como materiales de aportación pueden ser empleados los aceros inoxidable ferríticos o austeníticos.

6.12. Soldabilidad de los aceros inoxidable martensíticos

Los aceros inoxidable martensíticos tienen la facilidad de templar al aire, lo que hace que durante la operación de soldeo en la zona afectada térmicamente, se formen zonas con martensita. Por la dureza de la martensita existe el riesgo de agrietamiento, ya que esta tiene una baja ductilidad. En función de su composición la soldabilidad puede ser de buena a mala, al igual que también la necesidad de precalentamiento o post-calentamiento. Los materiales de aporte pueden ser similares a su composición o de naturaleza como los inoxidable austeníticos. Para cuando se realizan soldaduras de espesores grandes, en los aceros inoxidable martensíticos, se emplea una técnica llamada “buttering”, que consiste en un recubrimiento previo con un material de aporte austenítico.

6.13. Soldabilidad de los aceros inoxidable dúplex

Los aceros inoxidable dúplex tienen una estructura de austenita más ferrita, con lo que sus propiedades son una combinación de las mismas. Tienen mejores características en resistencia mecánica que los aceros inoxidable ferríticos y austeníticos, teniendo valores medios en conductividad térmica y dilatación lineal. Su soldabilidad es media, siendo el punto crítico la zona ZAT. Por su elevado contenido en ferrita hace posible que el agrietamiento en caliente no sea un problema. Por motivo de la temperatura de la soldadura, se pueden producir precipitados de carburos que en parte dependerán de la cantidad de carbono y si el metal está o no estabilizado. En los aceros dúplex más actuales, donde son más estudiados y equilibrados, incluso con contenidos de nitrógeno y bajos contenidos de carbono, hacen posible que los problemas que acusa

la zona ZAT sean minimizados sustancialmente. El calor de la soldadura hace que se incremente el contenido de ferrita y consecuentemente el crecimiento de grano, que a su vez genera una fragilización del acero. Suelen ser soldados sin realizar el precalentamiento. El material de aportación debe ser de estructura similar al metal base o también puede ser austenítico. Se recomienda que al final de la dilución del metal base con el metal de aportación, proporcione valores de ferrita comprendidos entre el 30-60%.

7. Selección de electrodos para aceros inoxidable

En la selección de electrodos inoxidable se debe tener en cuenta un porcentaje de ferrita balanceado, para que de esta forma se pueda conseguir la adecuada resistencia al agrietamiento, al impacto y a la corrosión en función de las condiciones de trabajo a las que estará sometida la pieza soldada. Por lo que es de vital importancia el poder estimar y medir dicho porcentaje de ferrita, en el proceso de selección. Para determinar el contenido de ferrita se pueden emplear tres métodos, como son instrumentos de laboratorio sensibles al magnetismo, a través de un examen metalográfico o mediante gráficos sabiendo la composición química del metal depositado.

7.1. Medición del contenido de ferrita por instrumentos magnéticos

La ferrita resulta que es magnética, y la cantidad presente en la soldadura es posible determinarla por su atracción magnética que es proporcional a la cantidad. Existen instrumentos para poder realizar esta medición como el Severn Gauge, que por comparación de densidades consigue separar las cantidades de ferrita. Otro instrumento es el Magna Gauge, este mide la tensión que es necesaria en un resorte para separar un imán de la soldadura, donde la fuerza requerida por el resorte y el porcentaje de ferrita, están correlacionados. El Severn Gauge es un equipo que puede ser empleado en fábrica y obra, mientras que Magna Gauge tiene un uso más de laboratorio, siendo su precisión mayor. La American Welding Society, AWS, tiene desarrollado un procedimiento de calibración, debido a que ambos equipos tienen una calibración muy crítica.

7.2. Medición del contenido de ferrita por examen metalográfico

Para cuando los valores de ferrita son entre el 4% y el 10%, resulta ser más exacto. La ventaja de este método es que se pueden obtener muestras del metal depositado relativamente pequeñas y puede ser empleado cuando no existe la posibilidad de emplear otros métodos.

7.3. Medición del contenido de ferrita por composición química

Existen una serie de diagramas desarrollados a partir de la experiencia para determinar o más bien predecir el porcentaje de ferrita. Los resultados obtenidos con diferentes diagramas pueden presentar ciertas diferencias. Algunos de los diagramas son:

- Diagrama de Maurer.
- Diagrama de Schaeffler.
- Diagrama Delong.
- Diagrama WRC-1992.
- Diagrama Espy.

En un principio los diagramas representaban la ferrita mediante unidades de volumen (%). Los diagramas del Welding Research Council, WRC, determinan el número de ferrita (FN), a través de una respuesta magnética. Resulta que el número de ferrita y el volumen (%) son equivalentes hasta llegar al 6%, pero para valores superiores a este empiezan a diferir. Por medio de la variación de la composición química es posible controlar el contenido de ferrita para el metal de aporte de acero inoxidable austenítico. El cromo actúa favoreciendo la formación de ferrita, mientras que el níquel actúa de forma contraria. Por lo que se tiene un equivalente de cromo (ferritizantes) y un equivalente de níquel (austenizantes).

7.4. Diagrama de Schaeffler y Delong

El diagrama de Schaeffler es una mejora del diagrama de Maurer empleado antes de apareciera este. El diagrama de Schaeffler tiene en consideración distintos elementos de aleación que intervienen en la formación de ferrita y austenita. A partir de esto, se define el concepto de cromo equivalente y níquel equivalente. Donde en la parte correspondiente al cromo, incluye los elementos alfaenos que son formadores de ferrita y en la parte del níquel incluye los elementos gammaenos, que son formadores de austenita. Cada elemento tienen aplicado un factor en función de la influencia que ejerce en la formación de ferrita o austenita.

Para el cromo equivalente tenemos:

$$\%Cr + \%Mo + (1,5 \times \%Si) + (0,5 \times \%Nb)$$

Para el níquel equivalente tenemos:

$$\%Ni + (30 \times \%C) + (0,5 \times \%Mn)$$

En el diagrama de Schaeffler se pueden identificar las fases austenítica, ferrítica y martensítica, que son características en los aceros inoxidable cuando son enfriados a velocidades normales. Están representadas las zonas de fragilización en frío por causa de la martensita, la zona de fragilización en caliente por causa de la austenita, la zona de fragilización por fase sigma y la zona de crecimiento de grano ferrítico. En la realización del diagrama de Schaeffler, se tomo como referencia la soldadura manual con electrodos revestidos, considerando que los depósitos tenían aproximadamente un 0,06% de nitrógeno. Más adelante con los nuevos procesos de soldadura, ya fue necesario tener en consideración la influencia del nitrógeno como elemento formador de ferrita. Para el caso del nitrógeno es más recomendable utilizar una modificación del diagrama de Schaeffler, que pasa a llamarse diagrama de Delong. En la figura 7.1 se muestra el diagrama de Schaeffler.

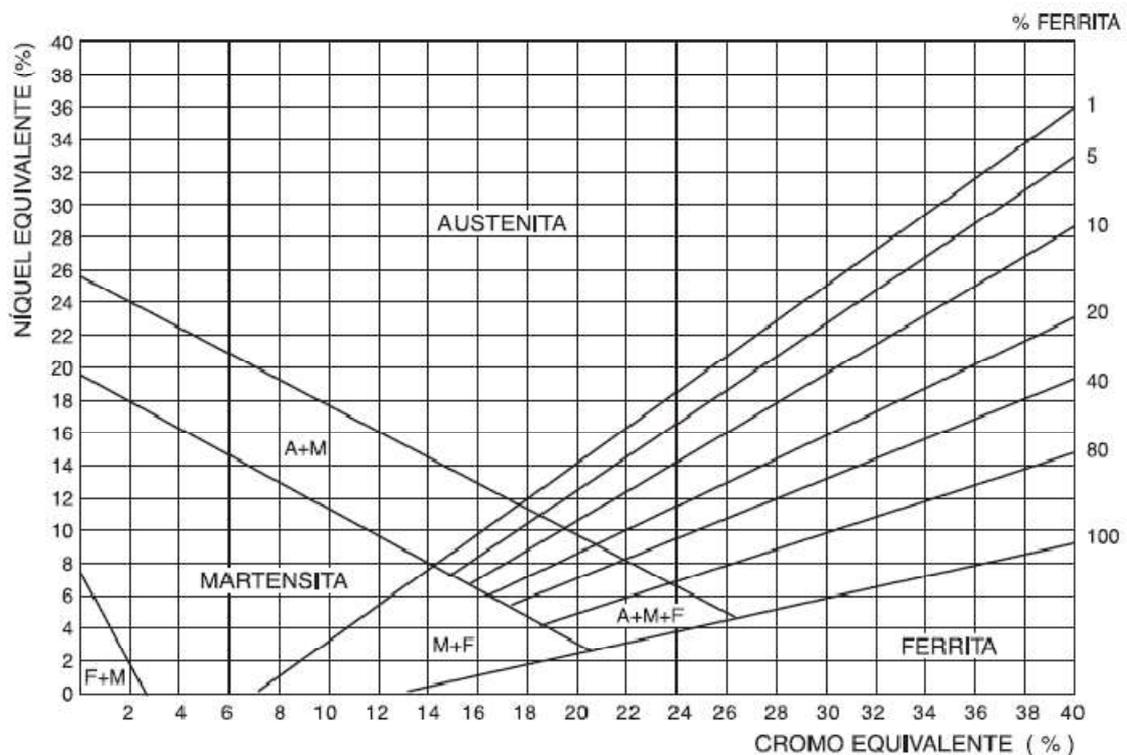


Figura 7.1: Diagrama de Schaeffler. [5]

Diagrama Delong

El diagrama Delong es una modificación del diagrama de Schaeffler. Este diagrama predice el número de ferrita sobre un FN=18 y al mismo tiempo incluye el nivel de nitrógeno en la predicción del número de ferrita. Se obtiene una correlación entre predicción y medición mejor que empleando el diagrama de Schaeffler. No deja de ser un instrumento empírico que fue desarrollado en la década de 1960 y 1970, para aleaciones de soldadura. Por eso mismo si las aleaciones empleadas difieren mucho respecto a las más comunes, el diagrama puede que no sea exacto. Por ejemplo, para

niveles de Mn superiores al 2%, este no se comporta como austenitizante y en consecuencia el diagrama tiende a sobreestimar la ferrita en los metales de aporte con elevado contenido de manganeso. Resaltar que tanto el diagrama de Schaeffler y Delong son herramientas de utilidad, pero siempre y cuando se entiendan sus limitaciones. En la figura 7.2 se muestra el diagrama Delong.

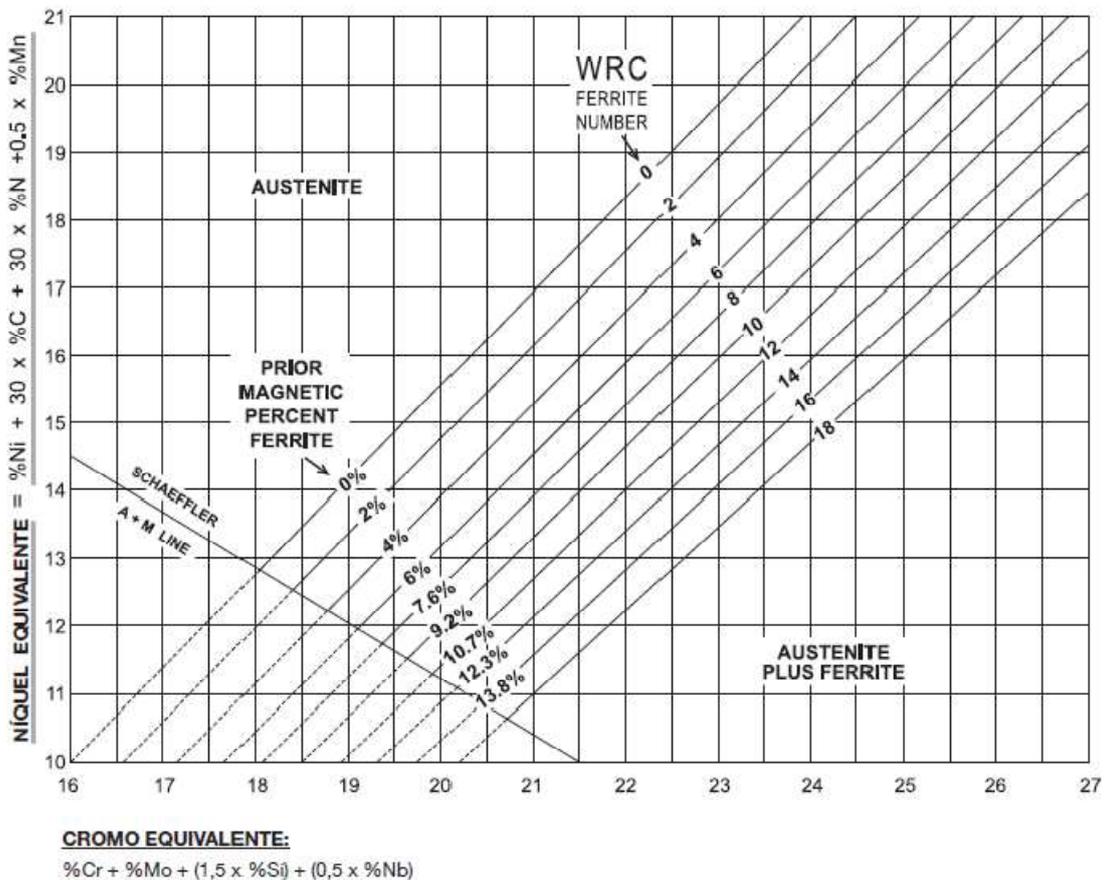


Figura 7.2: Diagrama Delong para aceros inoxidables soldados. [5]

Aplicación del diagrama Schaeffler

En términos totales, son dos los factores que se deben tener en cuenta a la hora de seleccionar el material de aporte en una soldadura de acero inoxidable.

- Con el objetivo de ofrecer resistencia a la corrosión, la composición química de la soldadura debe ser similar al metal base.
- Las características mecánicas de la estructura final deben ser las apropiadas a las condiciones de servicio final.

Dichas características dependen de la posición que tenga el punto del diagrama donde se ubica el material depositado. En la figura 7.3 se muestran las zonas críticas del diagrama de Schaeffler.

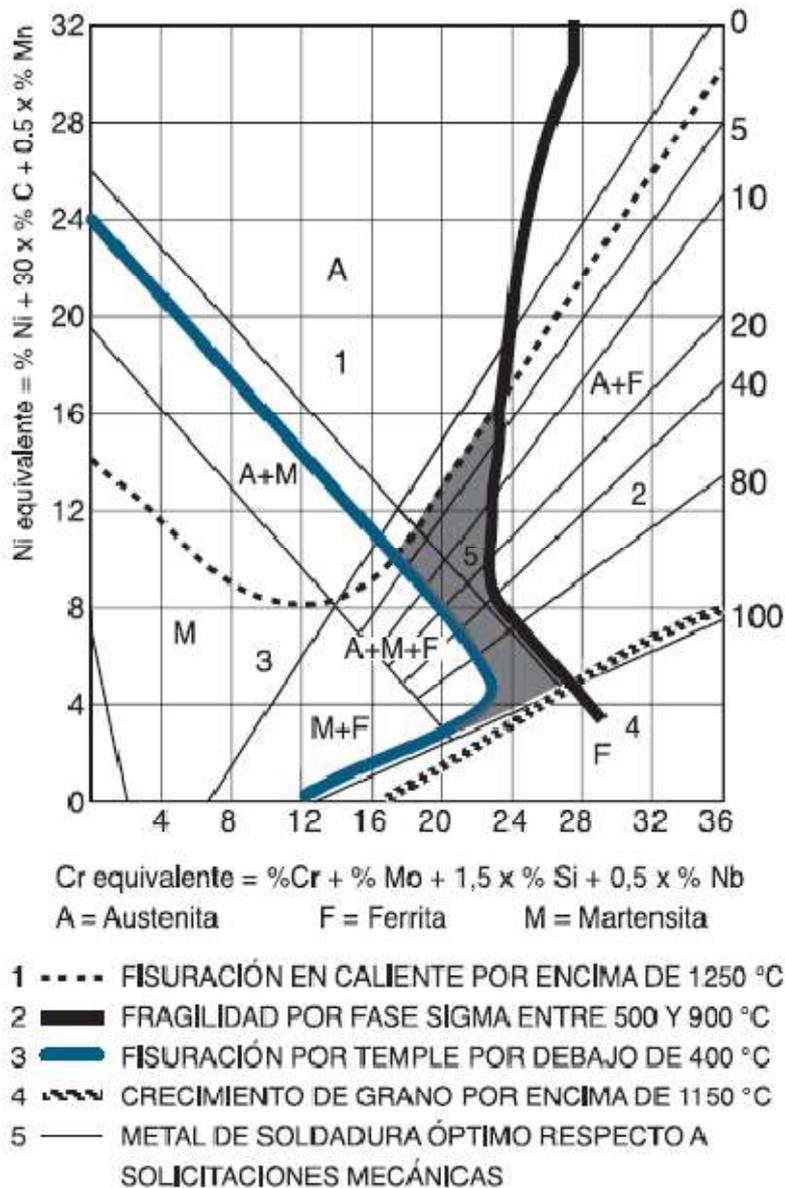


Figura 7.3: Zonas críticas del diagrama de Schaeffler. [5]

Procedimiento para la determinación del punto en el gráfico que representa al metal depositado:

1. Se calcula el cromo y níquel equivalente de cada uno de los metales base y se posiciona cada uno de ellos en el diagrama. En caso de soldar un acero austenítico con otro martensítico se pueden obtener los puntos 1 y 2. Para los aceros al carbono hay que tener en cuenta la decarburación producida en el proceso de soldadura, donde puede alcanzar valores cercanos al 50%, por lo que en la fórmula de níquel equivalente hay que cambiar el termino $30 \times \%C$ por el de $15 \times \%C$.

2. Ahora el punto que determina la composición química de la mezcla de ambos metales base, se encuentra en el centro de la recta formada por los puntos 1 y 2, independientemente del nivel de disolución de cada uno y si se dan las condiciones para que ambos materiales participen en una proporción similar (igual espesor, igual bise, arco simétrico, igual precalentamiento).
3. Calculo del cromo y níquel equivalente del metal de aporte, corresponde al punto 4 en el diagrama.
4. El punto que representa a los tres metales se ubica en un punto del diagrama que se encuentra entre la recta formada por el punto 3 y el punto 4. Este punto en función del porcentaje de dilución del metal base, estará posicionado más cerca o más lejos del material de aporte. Normalmente en un proceso de soldadura con electrodo revestido (SMAW), se establece un porcentaje de dilución sobre el 30%, este es el porcentaje de participación del metal base. El punto que representa la mezcla de los tres metales (punto 5) en el diagrama, estará posicionada más cerca del punto 4.
5. En función de la posición del punto 5 en el diagrama se pueden estimar las características mecánicas del metal depositado, donde en lo posible debe evitar las zonas críticas del diagrama de Schaeffler anteriormente mencionado.

En la figura 7.4 se muestra la posición de los puntos en el diagrama de Schaeffler, según el procedimiento antes mencionado como ejemplo.

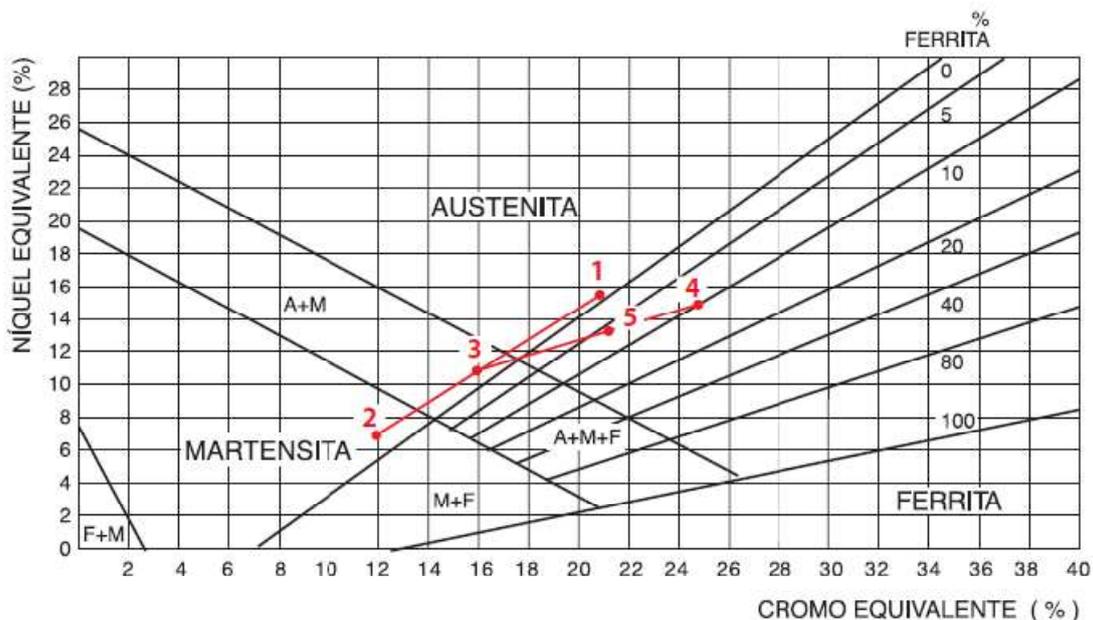


Figura 7.4: Ejemplo diagrama de Schaeffler. [5]

8. Seguridad en la soldadura al arco

Siempre que se realiza un soldadura al arco, donde algunas partes del equipo eléctrico están al descubierto, el operario debe tener especial cuidado con las normas de seguridad, para su propia protección y de otros operarios que comparten el mismo sitio de trabajo. La seguridad es una cuestión de sentido común.

8.1. Protección personal

Los elementos de protección indispensables a la hora de realizar una soldadura deben ser:

- Máscara de soldar, para la protección de los ojos, cara, cuello y debe tener filtros inactínicos según el proceso de soldadura empleado e intensidades de corriente empleadas.
- Guantes de cuero, deben ser del tipo mosquetero para la protección de la mano y de la muñeca.
- Delantal de cuero o colete, para la protección de salpicaduras que se puedan producir y de la exposición a rayos ultravioletas del arco.
- Polainas y casaca de cuero, para evitar quemaduras que se puedan ocasionar al trabajar en soldaduras cuya posición sea vertical y sobre la cabeza.
- Zapatos de seguridad, protección de los pies y deben cubrir los tobillos.
- Gorro, protección del cabello y del cuero cabelludo.

Cabe destacar como importante el evitar tener en los bolsillos elementos o materiales inflamables, como fósforos, encendedores, etc.

8.2. Protección de la vista

La protección de la vista es de vital importancia cuando se realiza un proceso de soldadura por arco eléctrico. El arco eléctrico que se emplea como fuente de calor, alcanza temperaturas del orden de los 4.000 °C, y desprende radiaciones con longitudes de onda que son visibles y otras que no lo son. Dentro del espectro de las radiaciones de longitud de onda no visible, las más nocivas para la vista son los rayos ultravioletas e infrarrojos. La quemadura que se produce en el ojo por causa de estas radiaciones no es permanente, pero sí muy dolorosa. La sensación que se tiene cuando se sufre esta quemadura, es la de tener arena caliente en los ojos. Para evitar esto hay que emplear un vidrio inactínico adecuado al proceso de soldadura empleado y acompañado de un vidrio transparente. En la figura 8.1 se muestra el efecto de los rayos en el ojo.

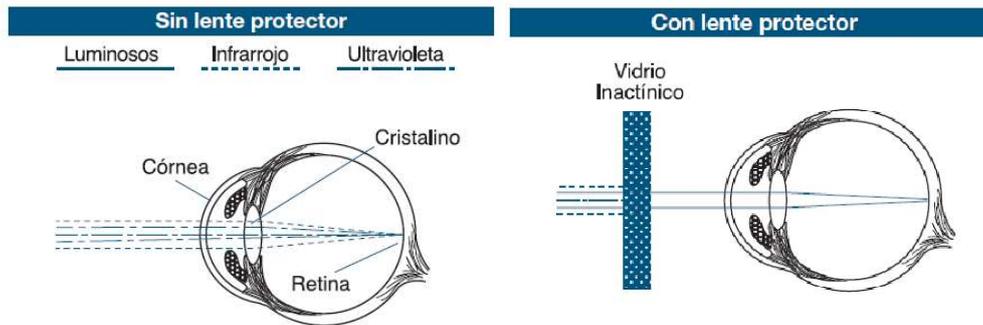


Figura 8.1: Influencia de los rayos en el ojo humano. [5]

A continuación se indica en la figura 8.2 una tabla de selección del vidrio inactínico en función del proceso de soldadura.

Escala de cristal inactínico a usar (en grados), de acuerdo al proceso de soldadura, torchado y corte

PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA O TÉCNICAS RELACIONADAS	INTENSIDADES DE LA CORRIENTE EN AMPERES																								
	0,5	1	2,5	5	10	15	20	30	40	60	80	100	125	150	175	200	225	250	275	300	350	400	450	500	
Electrodos recubiertos									9	10				11				12				13			14
MIG, sobre metales pesados											10	11				12				13			14		
MIG, sobre aleaciones ligeras											10	11	12			13			14			15			
TIG, sobre todos los metales y aleaciones					9	10	11				12	13			14										
MAG									10	11	12				13			14			15				
Torchado arco-aire											10	11	12	13	14			15							
Corte por chorro de plasma													11			12			13						
Soldadura por arco de microplasma	2,5	3	4	5	6	7	8	9	10	11			12			13				14			15		

Nota: Las áreas en azul corresponden a los rangos en donde la operación de soldadura no es normalmente usada. Según las condiciones de iluminación ambiental, pueden usarse un grado de protección inmediatamente superior o inferior al indicado en la tabla. La expresión metales pesados abarca los aceros y sus aleaciones, el cobre y sus aleaciones, etc.

Figura 8.2: Escala de cristal inactínico en función del proceso de soldadura. [5]

8.3. Seguridad en el equipo de soldadura

Para realizar un trabajo de soldadura con la facilidad y seguridad requeridas, se tiene que seguir las siguientes recomendaciones:

- Exclusivamente el personal cualificado debe de realizar la instalación eléctrica del equipo.
- Mantener el equipo lejos de superficies combustibles y atmósferas inflamables.
- No sobrecargar el cableado de la instalación eléctrica.
- No exceder el tiempo de trabajo del equipo para su correcto enfriamiento.

- Según el amperaje empleado en la operatoria, el equipo puede trabajar de forma continua.
- Revisión de los interruptores automáticos y circuito de alimentación.
- Emplear la sección adecuada en el cable de soldadura para poder soportar intensidad máxima suministrada por el equipo.

8.3.1. Circuitos con corriente

El voltaje empleado en la alimentación de los equipos de soldadura es de 230 V ó 400 V. Debido a que estos voltajes son altos y pueden ocasionar lesiones graves, el operario debe ser conocedor de ellos y tener cuidado de no realizar trabajos sobre los cables, interruptores, etc., sin antes haber desconectado el equipo abriendo el interruptor.

8.3.2. Línea a tierra

Todo circuito eléctrico debe tener una línea a tierra, para evitar posibles derivaciones a zonas metálicas susceptibles de ser tocadas por el operario y de esta forma evitar choques eléctricos que puedan ocasionar lesiones graves.

8.3.3. Cambio de polaridad

El cambio de polaridad se realiza cuando se cambia el polo del electrodo de positivo a negativo. Si el equipo tiene selector de polaridad, no se debe realizar dicho cambio con el equipo en funcionamiento, ya que puede saltar el arco eléctrico. Para los equipos sin selector también es necesario desconectar el equipo.

8.3.4. Cambio del rango de amperaje

En el equipo de soldadura no es aconsejable el realizar cambios de rango en la intensidad de corriente (amperaje), ya que esto puede producir daños en las tarjetas de control y otros componentes.

8.3.5. Circuito de soldadura

Siempre que no esté en uso el portaelectrodos, no debe ser dejado encima de la mesa o que pueda tener contacto con elementos que tengan conexión a la superficie que se suelda. En caso de que el portaelectrodo entre en contacto con el circuito de tierra, puede provocar un cortocircuito en el transformador del equipo.

8.3.6. Riesgo de incendio

En el lugar de trabajo pueden estar presentes atmósferas peligrosas. El riesgo de incendio está presente cuando los componentes (combustible, oxígeno y calor) están presentes a la vez. Hay sustancias cuyo punto de inflamación es bajo, y en tal caso no sería necesaria una chispa y si suficiente una fuente de calor. Algunas recomendaciones para prevenir los riesgos de incendio son:

- Nunca se debe soldar cerca de líquidos inflamables, gases, vapores, metales en polvo o polvos combustibles. En el caso que la zona de trabajo contenga gases, vapores o polvos, es necesario mantener aireado y ventilado mientras se realiza la soldadura.
- Identificar las posibles fuentes generadoras de calor. La transmisión de calor a materiales inflamables puede ser por conducción, radiación o chispa.
- Mantener la separación adecuada entre equipos o en su defecto, mediante medios de separación no inflamables.
- Se deben de realizar los mantenimientos en el equipo y deben estar documentados.
- Disponer de un extintor próximo a la zona de trabajo.

8.3.7. Ventilación

La falta de ventilación adecuada en zonas de trabajo puede ser un riesgo, debido al que el oxígeno disponible se consume, junto a la par del calor de la soldadura y los humos, el operario puede quedar expuesto a molestias graves y enfermedades.

8.3.8. Humedad

Debido a que la humedad entre el cuerpo y una fuente eléctrica, forma una línea que conduce la corriente eléctrica al cuerpo del operario, puede producir un choque eléctrico. El operario no debe trabajar en zonas donde el suelo y el ambiente estén húmedos. Debe conservar las manos, vestimenta y zona de trabajo siempre secos.

9. Metodología aplicada para la obtención de las probetas de ensayo

A continuación se indica la metodología o procedimientos empleados para la obtención de las probetas que son objeto de estudio en el presente proyecto. La base principal del mismo, es la de analizar el comportamiento y características mecánicas que presentan las soldaduras realizadas mediante soldadura TIG, en las probetas de acero inoxidable frente a la corrosión bajo tensión.

Para poder realizar un mejor estudio de la corrosión bajo tensión en la soldadura del acero inoxidable en ambientes corrosivos, se ha realizado un proceso de tracción de las probetas hasta alcanzar la zona plástica de deformación, donde se generan tensiones internas en el material y que combinadas con un ambiente corrosivo, como es el Cloruro Férrico con una concentración del 20% se crean las condiciones necesarias para dicho estudio.

El metal base empleado para las probetas son chapas de acero inoxidable AISI 316L (EN 1.4404), utilizando para la unión de las mismas el proceso de soldadura TIG, con varilla de aporte ER316L. Los distintos tipos de soldadura con arco eléctrico empleados en los aceros inoxidables, están detallados ampliamente en la memoria del presente proyecto.

Para el ensayo se han establecido 4 grupos de probetas, todas ellas de acero inoxidable AISI 316L, con un total de 5 probetas por grupo. Una probeta de cada grupo se ensayará a tracción hasta la rotura y así poder determinar la carga de rotura y límite elástico de cada una de ellas. Con estos valores se realiza una estimación de la carga que es posible aplicar, sin llegar a la carga de rotura, ya que se pretende realizar una deformación plástica en las probetas e inducir en el material tensiones internas.

El número de probetas utilizado en el ensayo de tracción sin rotura es de 16 probetas. Cada grupo ha sido sometido a una carga de tracción distinta, que se indicara más adelante. También se ensayan a corrosión húmeda localizada (Pitting) mediante Cloruro Férrico con una concentración del 20% y corrosión por diferencia de peso.

9.1. Proceso de soldadura TIG con material base AISI 316L y metal de aporte ER 316L

De los tres principales tipos de soldadura con arco eléctrico, se ha elegido la soldadura TIG para la realización del ensayo, por su gran calidad, pureza metalúrgica y acabado superficial. El equipo de soldadura TIG, es el modelo TransTig 1700, de la marca Fronius, indicado en la figura 9.1.



Figura 9.1: Equipo de soldadura TIG de la marca Fronius, modelo Transtig 1700.

La polaridad empleada es en corriente continua con polaridad inversa. La elaboración de las probetas ha sido realizada por medio de chapas de acero inoxidable AISI 316L, con formato de presentación de 200x100x1.5 mm, según se indica en la figura 9.2, y empleando como material de aporte varillas de acero inoxidable ER316L.



Figura 9.2: Chapas de acero inoxidable 200x100x1.5 mm AISI 316L.

La composici3n qu3mica del acero inoxidable empleado como metal base, se muestra en la figura 9.3 donde se indican las composiciones qu3micas para aceros inoxidables austen3ticos.

Composici3n % (a)

TIPO AISI AUSTENITICOS	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	OTROS
201	0,15	5,5-7,5	1,00	16,0-18,0	3,5-5,5	0,06	0,03	0,25N
202	0,15	7,5-10,0	1,00	17,0-19,0	4,0-6,0	0,06	0,03	0,25N
205	0,12-0,25	14,0-15,5	1,00	16,5-18,0	1,0-1,75	0,06	0,03	0,32-0,40N
301	0,15	2,00	1,00	16,0-18,0	6,0-8,0	0,045	0,03	
302	0,15	2,00	1,00	17,0-19,0	8,0-10,0	0,045	0,03	
302B	0,15	2,00	2,0-3,0	17,0-19,0	8,0-10,0	0,045	0,03	
303	0,15	2,00	1,00	17,0-19,0	8,0-10,0	0,20	0,15min	0,6 Mo
303Se	0,15	2,00	1,00	17,0-19,0	8,0-10,0	0,20	0,06	0,15min Se
304	0,08	2,00	1,00	18,0-20,0	8,0-10,5	0,045	0,03	
304H	0,04-0,10	2,00	1,00	18,0-20,0	8,0-10,5	0,045	0,03	
304L	0,03	2,00	1,00	18,0-20,0	8,0-12,0	0,045	0,03	
304LN	0,03	2,00	1,00	18,0-20,0	8,0-12,0	0,045	0,03	0,10-0,16N
302Cu	0,08	2,00	1,00	17,0-19,0	8,0-10,0	0,045	0,03	3,0-4,0Cu
304N	0,08	2,00	1,00	18,0-20,0	8,0-10,5	0,045	0,03	0,10-0,16N
305	0,12	2,00	1,00	17,0-19,0	10,5-13,0	0,045	0,03	
308	0,08	2,00	1,00	19,0-21,0	10,0-12,0	0,045	0,03	
309	0,20	2,00	1,00	22,0-24,0	12,0-15,0	0,045	0,03	
309S	0,08	2,00	1,00	22,0-24,0	12,0-15,0	0,045	0,03	
310	0,25	2,00	1,50	24,0-26,0	19,0-22,0	0,045	0,03	
310S	0,08	2,00	1,50	24,0-26,0	19,0-22,0	0,045	0,03	
314	0,25	2,00	1,5-3,0	23,0-26,0	19,0-22,0	0,045	0,03	
316	0,08	2,00	1,00	16,0-18,0	10,0-14,0	0,045	0,03	2,0-3,0Mo
316F	0,08	2,00	1,00	16,0-18,0	10,0-14,0	0,20	0,10min	1,75-2,5Mo
316H	0,04-0,10	2,00	1,00	16,0-18,0	10,0-14,0	0,045	0,03	2,0-3,0Mo
316L	0,03	2,00	1,00	16,0-18,0	10,0-14,0	0,045	0,03	2,0-3,0Mo
316LN	0,03	2,00	1,00	16,0-18,0	10,0-14,0	0,045	0,03	2,0-3,0Mo;0,10-0,16N
316N	0,08	2,00	1,00	16,0-18,0	10,0-14,0	0,045	0,03	2,0-3,0Mo;0,10-0,16N
317	0,08	2,00	1,00	18,0-20,0	11,0-15,0	0,045	0,03	3,0-4,0Mo
317L	0,03	2,00	1,00	18,0-20,0	11,0-15,0	0,045	0,03	3,0-4,0Mo
321	0,08	2,00	1,00	17,0-19,0	9,0-12,0	0,045	0,03	5x% C min Ti
321H	0,04-0,010	2,00	1,00	17,0-19,0	9,0-12,0	0,045	0,03	5x% C min Ti
330	0,08	2,00	0,75-1,5	17,0-20,0	34,0-37,0	0,04	0,03	
347	0,0,8	2,00	1,00	17,0-19,0	9,0-13,0	0,045	0,03	10x%C min Nb
347H	0,04-0,10	2,00	1,00	17,0-19,0	9,0-13,0	0,045	0,03	8x%Cmin-1,0max-Nb
348	0,08	2,00	1,00	17,0-19,0	9,0-13,0	0,045	0,03	0,2Co;10x%C
348H	0,04-0,10	2,00	1,00	17,0-19,0	9,0-13,0	0,045	0,03	
384	0,08	2,00	1,00	15,0-17,0	17,0-19,0	0,045	0,03	

Figura 9.3: Composici3n qu3mica de los aceros inoxidables austen3ticos. [5]

El material de aporte mediante varillas de acero inoxidable ER316L, se muestra en la figura 9.4, junto con su composición química.



Composició química:

C: 0.02%	Mn: 1.69%
Si: 0.38%	P: 0.030
S: 0.008	Cr: 18.1%
Ni: 11.1%	Mo: 2.1%

Figura 9.4: Composició química del metal de aporte con varilla ER316L. [5]

Antes del proceso de soldadura ha sido necesario limpiar las pletinas con la finalidad de eliminar la presencia de grasas, aceites u otros elementos que pueden provocar una contaminación del baño de fusión. La limpieza se ha realizado con disolvente universal.

Para realizar la soldadura de las chapas se ha mantenido una distancia aproximada de 1 mm entre ellas, con una cierta separación en forma de V para compensar el cierre que provoca la primera puntada que se realiza. Se han empleado sargentos para poder fijar las chapas a la mesa de trabajo y evitar que se desplacen durante el proceso de punteo y de soldadura. Así de esta forma las chapas quedan alineadas y es posible continuar con el punteo.

Después de haber realizado el punteo en todo el tramo a soldar de las chapas, se pasa a realizar el cordón de soldadura sobre el mismo de forma continua y en una sola pasada. Mencionar que antes de empezar a realizar la soldadura en las piezas buenas, se ha dedicado tiempo con otras chapas para adquirir destreza en dicha soldadura. Una vez terminada la soldadura se limpia la escoria con un cincel y se deja enfriar un poco la soldadura antes de liberar las chapas de los sargentos, para de esta forma evitar deformaciones.

Empleando una radial y un disco, se realiza un desbaste de la zona de soldadura para de esta forma eliminar el material sobrante e igualar el espesor del cordón de soldadura al espesor de la chapa y un pulido de la misma. En la figura 9.5 se muestra la bancada con

el tornillo de banco y la radial, donde se ha realizado el desbaste y pulido del cordón de soldadura.



Figura 9.5: Bancada con tornillo de banco y radial, para la retirada de material sobrante y pulido.

Después de haber realizado y terminado el proceso de obtención de las chapas soldadas y totalmente preparadas, se ha procedido al marcado dimensional de las probetas. Las dimensiones de las probetas son 20 x 80 mm y el número de probetas por chapa es de 8. Cada grupo de ensayo consta de 5 probetas como se ha comentado anteriormente, dejando 3 probetas de reserva por posibles imprevistos que pudieran surgir durante los ensayos. En las figuras 9.6 y 9.7 se muestran la cizalladora empleada y el proceso de corte para la obtención de las probetas.



Figura 9.6: Cizalladora empleada en el corte de las probetas.



Figura 9.7: Proceso de corte de chapas para obtención de probetas.

En la figura 9.8 se muestra el resultado final de las probetas después de realizar el proceso de corte de las mismas. Esto es una muestra del total de las 20 probetas realizadas.



Figura 9.8: Probetas de acero inoxidable AISI 316L + ER 316L.

9.2. Ensayo de tracción realizado para las probetas con material base AISI 316L y metal de aporte ER 316L.

El ensayo de tracción es el más utilizado para determinar propiedades mecánicas de los materiales, por la sencillez de la preparación de la probeta y ejecución del ensayo, repetibilidad y fiabilidad de los resultados que se derivan del mismo. La información que se precisa en el ensayo de tracción es la fuerza F que se aplica y el alargamiento ΔL que se produce en la probeta. En la descripción del ensayo de tracción, la fuerza es aplicada en uno de los extremos mientras que la otra mordaza permanece fija.

Siendo la representación más habitual que se obtiene de forma directa del ensayo de tracción, es un diagrama fuerza-alargamiento. El ensayo de tracción está normalizado por diferentes normas, siendo la empleada para este caso la norma ASTM E8/E8M-16ae1 “Métodos de prueba estándar para pruebas de tensión de materiales metálicos”.

Posteriormente las probetas serán empleadas en el ensayo de corrosión, ya que después del ensayo de tracción sin alcanzar la rotura, habremos inducido tensiones internas en el material, debido a la deformación plástica generada.

El equipo empleado para el ensayo de tracción es de la marca Ibertest, compuesto por una máquina universal de ensayos, la cual consta de una serie de accesorios para diversos ensayos. En nuestro caso y para el ensayo de tracción se han empleado dos cabezales de tracción, que incorporan cada uno de ellos una mordaza para la sujeción de la pieza o probeta. Un cabezal de tracción es fijo y situado en la parte inferior de la máquina, mientras el otro es móvil y situado en la parte superior.

Después de sujetar la probeta con las mordazas y mediante el equipo informático que controla la máquina, y utilizando el programa informático WinTest32, se procede al inicio del ensayo configurando previamente las características del ensayo. Dicha configuración consiste en la introducción de la fuerza a emplear en el ensayo y las dimensiones de la pieza, como anchura, espesor y longitud calibrada.

Cabe destacar, que se ha realizado un ensayo de rotura para cada grupo de probetas, más 4 ensayos de tracción con cargas inferiores a la de rotura en cada uno de los 4 grupos de probetas. Finalmente con el programa informático WinTest32, se realiza la extracción de datos del ensayo, mediante exportación a un archivo Excel. Los datos extraídos del ensayo son fuerzas de carga (kN), alargamientos (mm) y tiempo (s).

Las fuerzas empleadas para el ensayo de cada uno de los grupos ha sido: Grupo 1 (11.2 kN); Grupo 2 (12,2 kN); Grupo 3 (13 kN); Grupo 4 (14 kN). A continuación en la figura 9.9 se muestra el equipo para el ensayo de tracción de la marca Ibertest.

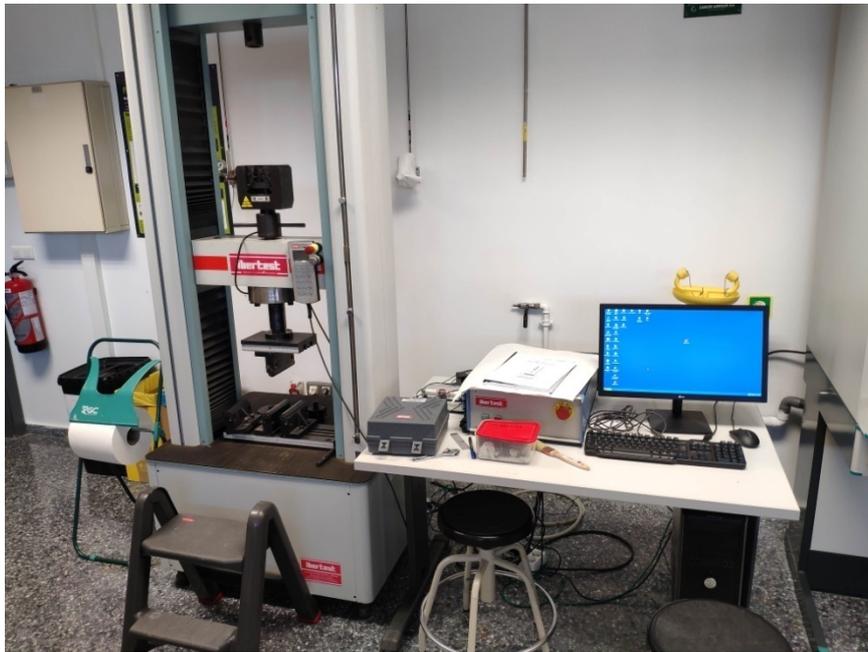


Figura 9.9: Máquina de ensayo de tracción marca Ibertest y equipo informático.

9.2.1. Tensión de Rotura, Alargamiento en % y Módulo de Elasticidad

Tensión de rotura

Tal como se ha comentado anteriormente, en el ensayo de tracción la representación más habitual es la de un diagrama fuerza-alargamiento. En este diagrama los puntos característicos y sus posiciones relativas entre ellos pueden variar, para el

mismo material, ya que la fuerza necesaria para deformar o romper depende del área de la sección transversal de la probeta. Para determinar las tensiones, habrá que realizar el cálculo en función de la fuerza soportada y el área de la probeta. En la figura 9.10 se muestra un diagrama de tensión-deformación indicando los tramos más relevantes del mismo.

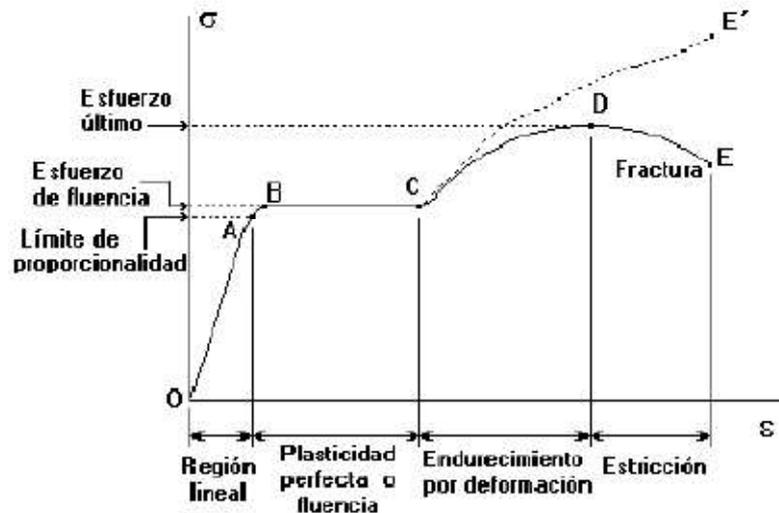


Figura 9.10: Diagrama esquemático tensión-deformación en el ensayo de tracción de un acero. [23]

A continuación se detallan cada uno de los tramos indicados en el diagrama tensión-deformación para un ensayo de tracción de un acero:

- Tramo OA: Tramo de comportamiento elástico lineal. En este tramo los valores de tensión aplicados y los alargamientos unitarios experimentados, son proporcionales. El proceso en este tramo tiene una reversibilidad total del proceso de carga, es decir, recupera su forma y tamaño una vez se eliminan las cargas aplicadas. Siendo el valor que limita este comportamiento denominado límite de proporcionalidad, σ_p .
- Tramo AB: Tramo de comportamiento elástico no-lineal. En este tramo predomina el comportamiento elástico, pero sin mantener la proporcionalidad entre tensión y deformación. En caso de aplicar una fuerza que lleve el material entre los puntos A y B, y después se elimine la fuerza aplicada, la descarga se produce en la línea BAO. El valor de tensión que limita este comportamiento se conoce como límite elástico.
- Tramo BC: Tramo de fluencia del material. A nivel macroscópico se observa que el material no necesita de un aumento de tensión para que la deformación aumente. La fluencia de este tramo está caracterizada por un valor de tensión de

fluencia, el cual es próximo al límite elástico del material. La dificultad para poder medir estos valores hace que se considere como límite elástico el valor que proporciona una deformación permanente en la probeta del 0,2%.

- Tramo CD: Tramo de endurecimiento por deformación. Después de atravesar la zona de fluencia, el material necesita que se aumente la tensión para siga aumentando la deformación. Es un tramo no lineal. El comportamiento elástico ha terminado en el tramo BC y CD, sin embargo el material sigue teniendo dicha propiedad.

Si consideramos un punto P perteneciente al tramo CD y se realiza la descarga de la probeta, la descarga no seguirá la línea PCBAO, sino que discurrirá por una nueva línea PO', la cual es paralela a la línea AO, siendo el punto O' el estado descargado. Esto define un comportamiento elastoplástico, donde parte de la deformación total que tenía el material, se recupera elásticamente y otra parte se queda en el material, donde pasa a conocerse como deformación plástica o permanente.

Si después de haber descargado el material se vuelve a cargar, la evolución se realizará por la línea PO' de manera elástica lineal equivalente a la del tramo OA, donde pasará a tener un límite elástico aparente de valor superior al límite elástico. Cuando se alcanza el punto D, independientemente del recorrido seguido, se obtiene el valor de tensión de rotura del material, σ_R , que es una propiedad no alterable mecánicamente, al contrario que el límite elástico.

- Tramo DE: Esta es la zona de estricción. En el instante se sobrepasa el punto D, se puede observar que cada vez hace falta menos fuerza para seguir deformando la probeta, lo que indica que ofrece menos resistencia. La disminución de la fuerza aplicada viene relacionada con la menor sección transversal de la probeta, lo que se conoce como estricción.

En este caso que el área transversal instantánea A es sensiblemente menor a la inicial A_0 , se recomienda estudiar la evolución de la tensión verdadera, σ_v , línea discontinua representada en el gráfico. Tanto en la zona elástica e incluso en la elastoplástica no existe una diferencia significativa entre la sección original y la sección instantánea, por lo que la tensión verdadera es solo un poco superior a la tensión ingenieril σ .

En la zona de estricción el área instantánea A disminuye considerablemente, haciendo que la tensión verdadera aumente hasta el momento de rotura y que esta se separe del valor de tensión ingenieril. Esto es la confirmación de que el material sigue ofreciendo resistencia, siendo que la tensión verdadera aumenta hasta el punto de rotura.

El comportamiento de esta zona es elastoplástico y análogo al tramo anterior. Es razonable que el valor de tensión de rotura sea el valor máximo de la tensión ingenieril, a pesar de saber que la tensión real sigue aumentando, porque σ_R está ligada al valor máximo de carga que el material puede soportar, y resulta de interés el valor máximo en el instante de rotura del material, ya que este valor es inferior debido a la estricción.

Para determinar el cálculo de la tensión de rotura (σ_R) utilizamos la siguiente ecuación:

$$\sigma_r = \frac{F_r}{A} \quad (\text{Ec.1})$$

Donde:

F_r = Carga o esfuerzo máximo efectuado sobre la probeta, punto D del diagrama.

A = Sección transversal de la probeta de ensayo (a x b).

σ_r = Tensión de rotura del material.

Alargamiento en %

La ductilidad es la propiedad que tienen los metales o aleaciones, que bajo la acción de una fuerza pueden deformarse sin romperse. Los materiales que presentan esta propiedad se conocen como dúctiles. Los materiales no dúctiles se califican como frágiles. Aunque los materiales dúctiles también pueden llegar a romperse bajo el esfuerzo adecuado, esta rotura sólo sucede tras producirse grandes deformaciones. En la figura 9.11 se muestra el diagrama tensión-deformación que compara el comportamiento de ambos tipos de material.

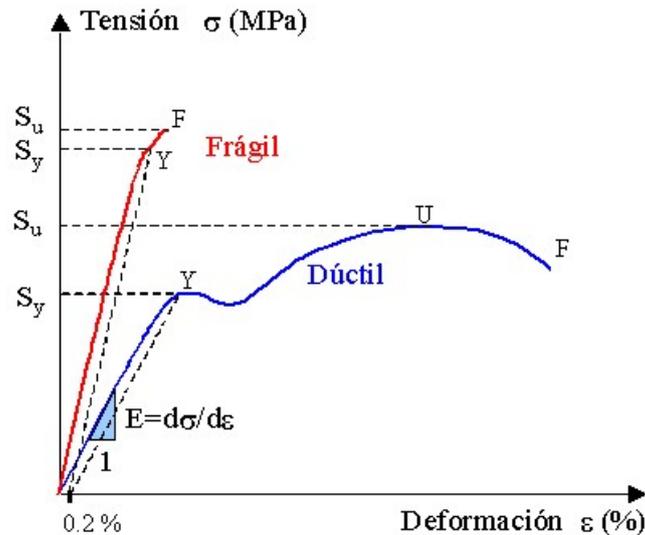


Figura 9.11: Diagrama esquemático tensión-deformación en el ensayo de tracción de materiales frágiles y dúctiles. [21]

La ductilidad también es conocida de forma cuantitativa como *deformación unitaria o porcentual*. Esta deformación porcentual puede que no sea precisa ya que no tiene en cuenta la contracción del material al romperse, debido a su recuperación elástica. Por esto mismo es aconsejable medir la longitud de la probeta antes y después del ensayo. El alargamiento % se determina teniendo en consideración la norma UNE-EN 10002, donde se expresa la ecuación para determinar la longitud de las probetas de sección rectangular.

$$l_0 = 5,65 * \sqrt{b * e} \quad (\text{Ec.2})$$

Donde:

l_0 = Longitud a tomar de referencia

e = Espesor de la probeta

b = Anchura de la probeta

El alargamiento porcentual a la rotura $\Delta l(\%)$, es el porcentaje de deformación plástica a rotura y se determina mediante la siguiente expresión:

$$\Delta l(\%) = \frac{l_0 - l_f}{l_0} * 100 \quad (\text{Ec.3})$$

Donde:

l_f = Longitud final de la probeta (al final del ensayo de tracci3n)

M3dulo de Elasticidad

El m3dulo de elasticidad (E), tambi3n conocido como m3dulo de Young, es un par3metro característico de cada material que indica la relaci3n existente entre los incrementos de tensi3n aplicados en el ensayo de tracci3n y los incrementos de deformaci3n longitudinal unitaria o porcentual, en la zona de comportamiento el3stico del material. Equivale a la tangente en cada punto de la zona el3stica en la gr3fica tensi3n-deformaci3n obtenida en el ensayo de tracci3n.

El m3dulo de elasticidad es constante en la zona de deformaci3n el3stica del material, con un comportamiento lineal de la misma (Ley de Hooke). El m3dulo de elasticidad indica la rigidez de un material, cuanto m3s r3gido es un material mayor es su m3dulo de elasticidad. En la figura 9.12 se indica la zona de comportamiento lineal entre tensiones y deformaciones para un diagrama tensi3n-deformaci3n.

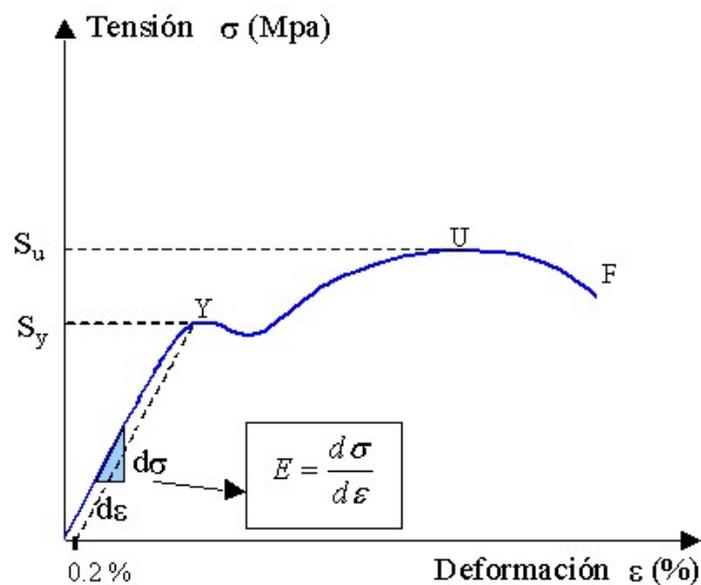


Figura 9.12: Definici3n del m3dulo de elasticidad mediante diagrama tensi3n-deformaci3n. [22]

Para el cálculo del módulo de elasticidad se determina mediante las siguientes expresiones:

$$E = \frac{F_e * l_0}{\Delta l * A} \quad (\text{Ec.4})$$

$$E = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon} = \text{tg} \alpha \quad (\text{Ec.5})$$

Donde:

F_e = Carga elástica

l_0 = Longitud inicial de la probeta

Δl = Incremento de longitud sufrido en la probeta

A = Sección de la probeta

E = Módulo de elasticidad

9.3. Corrosión por picaduras – Pitting

La corrosión por pitting es la disolución localizada y acelerada de un metal, esto como resultado de la ruptura de la película de óxido. Muchas aleaciones como el acero inoxidable, son útiles solo porque producen en forma espontánea una película pasivado de óxido, la cual reduce en forma importante la tasa de corrosión. Sin embargo estas películas son a menudo susceptibles a la ruptura localizada, lo que da como resultado una acelerada disolución del metal. Si el ataque se inicia en una superficie abierta, se llama corrosión por picaduras (pitting corrosión). Esta forma de corrosión puede producir fallas estructurales en componentes por perforación y por debilitamiento.

La corrosión por pitting se desarrolla solo en presencia de especie aniónicas agresivas y iones cloro, aunque estos factores no son los únicos. La severidad del pitting tiende a variar logarítmicamente con la concentración de cloro. El cloro es un anión de un ácido fuerte, y muchos cationes metálicos muestran considerable solubilidad en soluciones con cloro. Este compuesto es un anión relativamente pequeño y de alta difusividad, lo que interfiere en la pasivación natural. El pitting es considerado como un proceso de naturaleza autocatalítica, una vez que la perforación empieza a crecer, las condiciones desarrolladas son tales que promueven el crecimiento de la perforación. Las reacciones catódicas y anódicas que comprenden la corrosión están separadas espacialmente durante el pitting.

El medio inmediato a la perforación tiende a agotar los reactantes catódicos como el oxígeno, lo cual permite que las reacciones catódicas se desarrollen en otras partes de la

superficie del metal expuesto, donde hay mayor concentración de reactivos. En la zona cercana a la perforación empieza a aumentar la concentración de cationes metálicos y especies aniónicas como el cloro, el cual electroemigra a la perforación manteniendo la carga neutral por balance de cargas asociadas a la concentración del catión.

El pH en el pit es bajo debido a la hidrólisis del catión y la ausencia de reacciones catódicas locales. El ácido clorhídrico generado es muy agresivo para casi todos los metales y por lo tanto las picaduras tienden a propagarse.

Las perforaciones a menudo crecen bajo la superficie del metal. Los poros a menudo están cubiertos. Esta situación puede hacer extremadamente difícil la detección visual, el conocimiento de la severidad del ataque puede ser pasado por alto y la probabilidad de fallas catastróficas aumenta. La cubierta de la perforación puede ser precipitaciones derivadas de las reacciones de hidrólisis y partículas que formaron el film pasivador.

Estas cubiertas hacen que la detección óptica sea muy difícil ya que estos materiales son reflectantes y se confunden con el metal base. Las perforaciones de corrosión tapadas se pueden visualizar, exponer mediante agitación ultrasónica, la cual revela la dimensión del daño. Una vez que se rompe la película pasivadora y se inicia el pitting, y se generan condiciones para que perforaciones estables vuelvan a crecer. La ruptura del film pasivador inicia el proceso corrosivo y probablemente es el fenómeno más desconocido.

Los mecanismos de penetración que inician el pitting involucran el transporte de aniones agresivos a través del film pasivador hacia la interfase metal/óxido. La migración aniónica puede ser asistida por campo eléctrico en el film, Los mecanismos de penetración se basan en la existencia de un tiempo de inducción para que el cloro se transforme en electrolito. Otras teorías indican que, se basan que el film pasivador es una película muy delgada que está en constante ruptura y reparación.

El stress mecánico en superficies débiles o con imperfecciones, y la tensión superficial pueden generar la ruptura del film pasivador. El crecimiento del pit depende de la composición del material, concentración del electrolito y potencial eléctrico. El fenómeno de transferencia de masa, característica del pitting, influye en la cinética de crecimiento, a través de la concentración de electrolitos en la perforación.

La estabilidad de este proceso depende de la mantención de la composición del electrolito y el potencial en el fondo de la perforación que debe ser lo suficientemente alto para evitar la repasivación. En la industria de alimentos, líquidos de servicio como agua y salmueras refrigerantes, son los mayores causantes de este tipo de daño. El pitting puede asociarse a todo tipo de equipamiento, pero se encuentra en forma más frecuente en intercambiadores de calor, tuberías, fondos de estanques donde pueden

permanecen remanentes de productos de limpieza. Este problema se puede agudizar con la presencia de Hipoclorito o cloro en el agua de enjuague.

9.3.1. Metodología del ensayo de resistencia a la corrosión por picaduras

Para este ensayo se han empleado las 16 probetas obtenidas mediante soldadura TIG de acero inoxidable AISI 316L como base y con material de aporte ER 316L. El ensayo de resistencia a la corrosión esta normalizado por diferentes normas, siendo la empleada para este caso la norma ASTM G48-11(2015) “Métodos de prueba estándar para la resistencia a la corrosión por picaduras y grietas de aceros inoxidables y aleaciones relacionadas mediante el uso de solución de cloruro férrico”.

Estas 16 probetas son las mismas que han sido utilizadas en el ensayo de tracción, donde se han constituido 4 grupos de 4 probetas. Siendo las fuerzas de tracción empleadas las siguientes: Grupo 1 (11.2 kN); Grupo 2 (12,2 kN); Grupo 3 (13 kN); Grupo 4 (14 kN). Con esto se pretende estudiar el efecto de la corrosión bajo tensión en la soldadura realizada en el presente proyecto.

Como agente corrosivo se ha empleado el Cloruro Férrico (FeCl_3) con una concentración del 20% y una exposición al medio de 96 horas. La zona de análisis en las probetas es de una dimensión de 20 x 20 mm y localiza en el cordón de soldadura realizado. En el recuento de las picaduras se ha utilizado un microscopio Olympus B061, dividiendo el área de estudio de la probeta en distintas secciones, para ser lo más preciso posible.

Para el recuento de picaduras en orificios o grandes cráteres se ha empleado la siguiente expresión, $n^\circ \text{ picaduras} = \frac{\text{Ø}^2}{0.5^2}$, que realiza una equivalencia de estos orificios a picaduras. Donde Ø , es el área ocupada por el orificio pasante. En la figura 9.13 se muestra la vitrina de gases, donde se ha realizado la exposición de las probetas al efecto del Cloruro Férrico con una concentración del 20%, durante un periodo de 96 horas.



Figura 9.13: Vitrina de gases de la marca Flores Valles.

9.3.2. Metodología del ensayo de corrosión por pérdida de peso

En esta parte se pretende determinar cuál ha sido la pérdida de material de las probetas, a causa de la corrosión por la exposición a un medio corrosivo como es el Cloruro Férrico con una concentración del 20%. Los resultados que se obtienen son fiables y rápidos, siendo común su uso en el sector industrial a la hora de seleccionar ciertos materiales según aplicaciones. Su proceso consiste en medir el peso de las probetas antes y después del ensayo de corrosión en Cloruro Férrico al 20%. En la figura 9.14 se muestra la balanza de precisión empleada modelo KERN 770.



Figura 9.14: Balanza de precisión KERN 770.

10. Soldadura de acero inoxidable AISI 316L con varilla de aporte ER 316L

En el estudio de las características resistentes para este tipo de soldadura, se han empleado las tensiones de rotura y los límites elásticos de las probetas ensayadas. Estos datos se obtienen por medio del ensayo de tracción, descrito anteriormente.

10.1. Resultados del ensayo de tracción

A continuación se indican los datos obtenidos mediante el ensayo de tracción, para cada uno de los 4 grupos de probetas con soldadura de metal base AISI 316L y metal de aporte ER 316L. En una primera instancia se indican los datos de las probetas de cada grupo ensayadas a tracción hasta alcanzar la rotura.

Los datos de carga de rotura de estas probetas ensayadas nos sirve, para determinar los valores de carga inferiores a la carga de rotura que podemos emplear en el resto de probetas, para realizar el ensayo de tracción a distintas fuerzas de carga para cada uno de los 4 grupos. Las cargas empleadas en los respectivos grupos son: Grupo 1 (11,2 kN); Grupo 2 (12,2 kN); Grupo 3 (13 kN); Grupo 4 (14 kN). En la figura 10.1 se muestran las probetas ensayadas a tracción hasta alcanzar la rotura.



Figura 10.1: Probetas de acero inoxidable AISI 316L + ER 316L, ensayadas a tracción hasta alcanzar la rotura, para cada uno de grupos de ensayo.

Se muestra en la figura 10.2 la curva tensión-deformación del ensayo a tracción hasta la rotura de la probeta M1, perteneciente al Grupo 1:

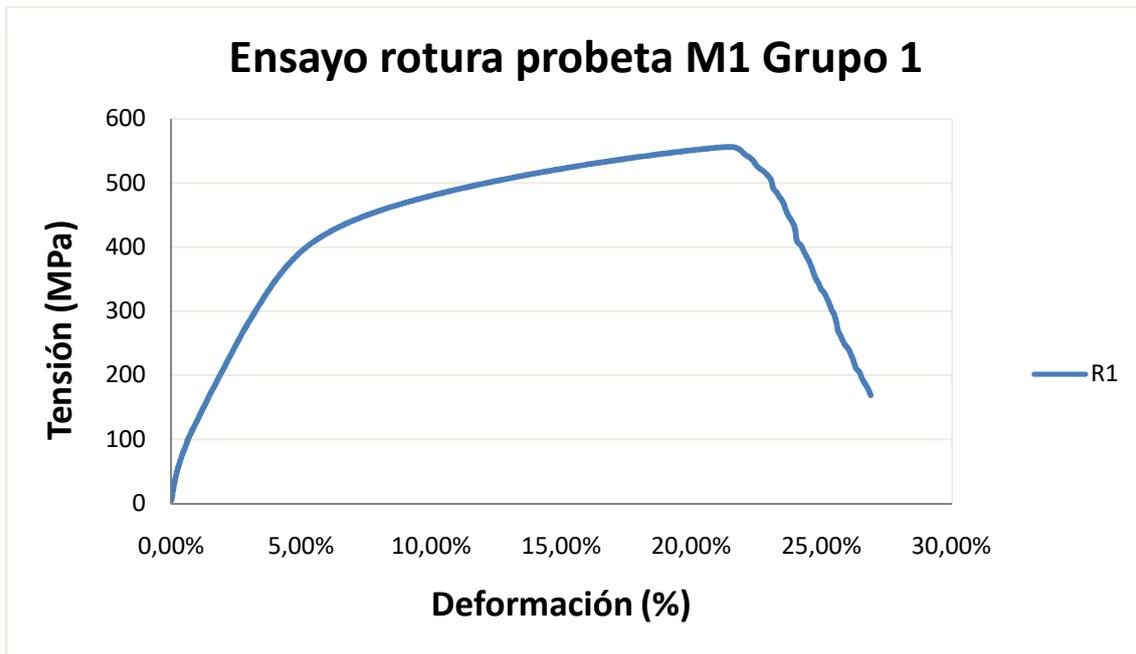


Figura 10.2: Curva tensión-deformación ensayo de tracción hasta la rotura probeta M1.

De forma análoga se indica en las figuras 10.3, 10.4 y 10.5, las curvas de tensión-deformación para las probetas M2, M3 y M4, respectivamente.

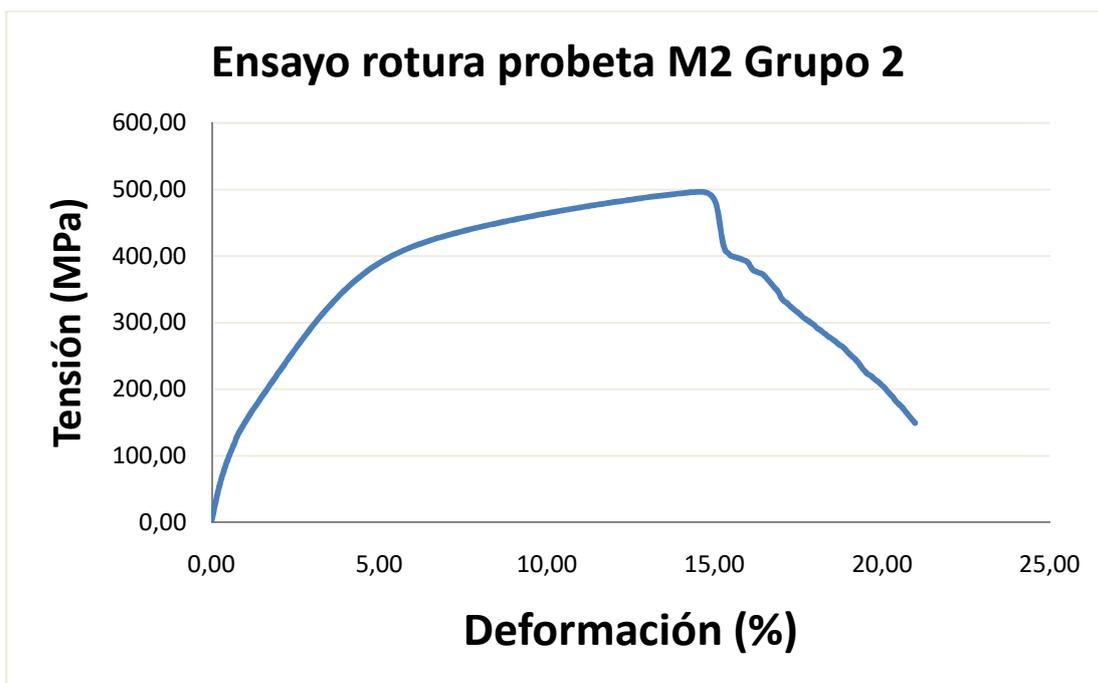


Figura 10.3: Curva tensión-deformación ensayo de tracción hasta la rotura probeta M2.

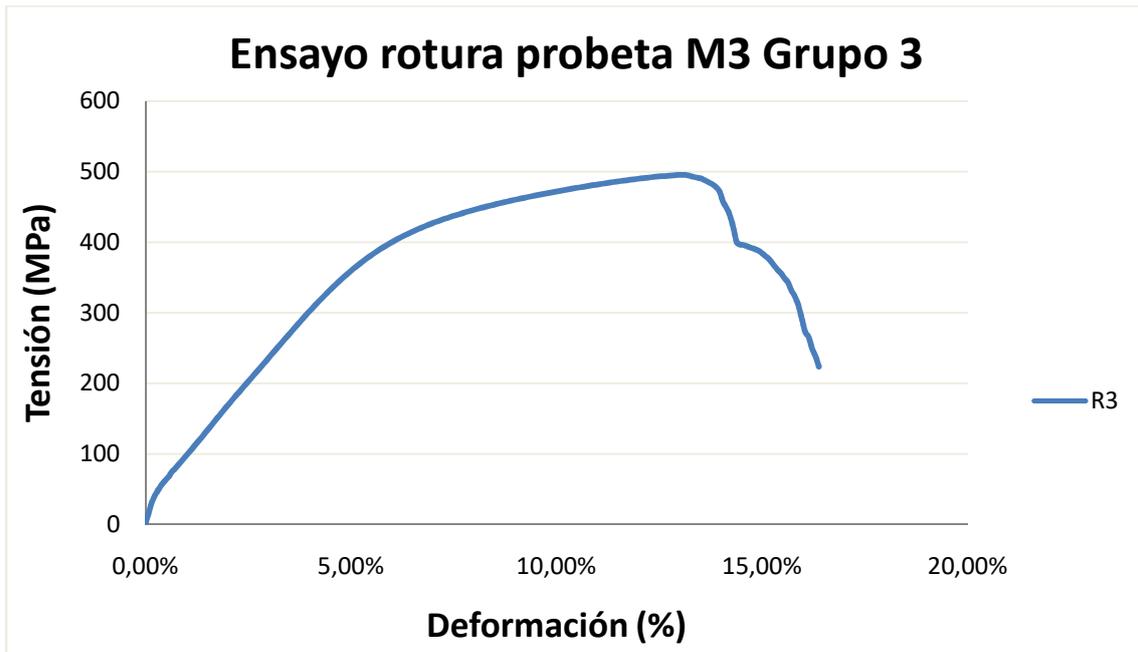


Figura 10.4: Curva tensión-deformación ensayo de tracción hasta la rotura probeta M3.

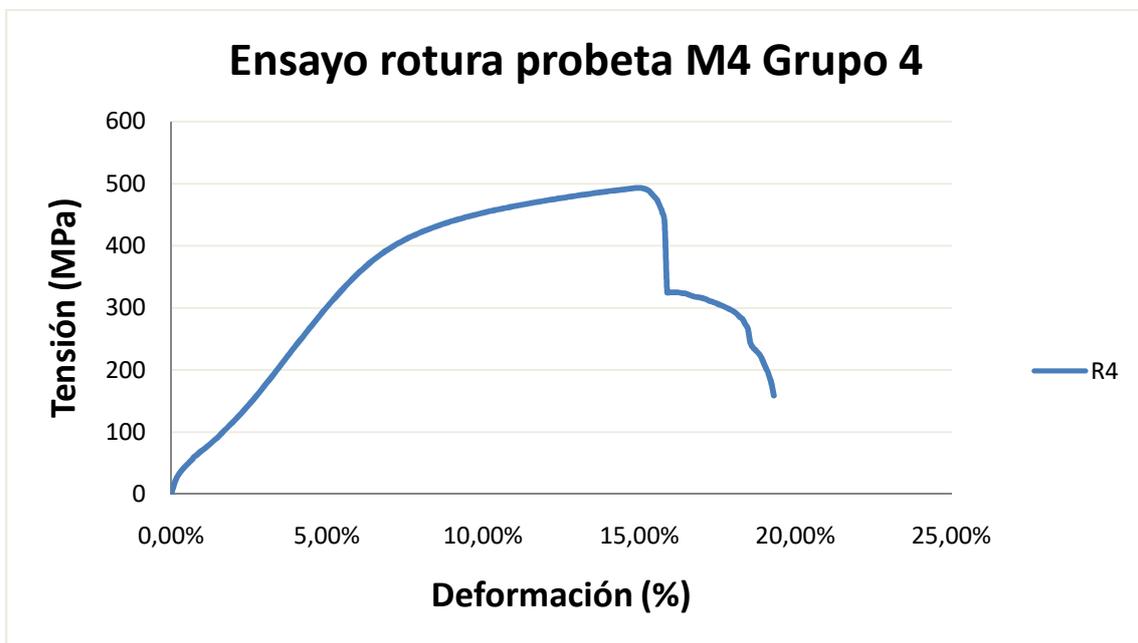


Figura 10.5: Curva tensión-deformación ensayo de tracción hasta la rotura probeta M4.

En la tabla 10.1 se resumen los parámetros calculados a partir del ensayo de rotura de las probetas:

	M1	M2	M3	M4
TENSIÓN DE ROTURA (Mpa)	555,73	496,15	495,37	492,77
LÍMITE ELÁSTICO (Mpa)	335,66	303,00	349,07	369,46
MÓDULO YOUNG (Mpa)	15.392,67	14.454,55	17.228,58	25.006,45
ΔL (%)	26,88	20,97	16,37	19,29

Tabla 10.1: Cuadro resumen propiedades mecánicas soldadura AISI 316L + ER 316L, a partir del ensayo de tracción hasta la rotura, para las muestras M1, M2, M3 y M4.

A continuación se muestran las curvas tensión-deformación de los ensayos de tracción realizados en las probetas de los distintos grupos, pero sin alcanzar la carga de rotura. Solo se pretende generar deformaciones plásticas en las probetas, para inducir en las mismas tensiones internas, para su análisis en la corrosión bajo tensiones. En la figura 10.6 se indica la curva tensión-deformación del conjunto de probetas pertenecientes al Grupo 1, que ha sido ensayado con una tensión de 373,33 MPa, sin alcanzar la zona de rotura.

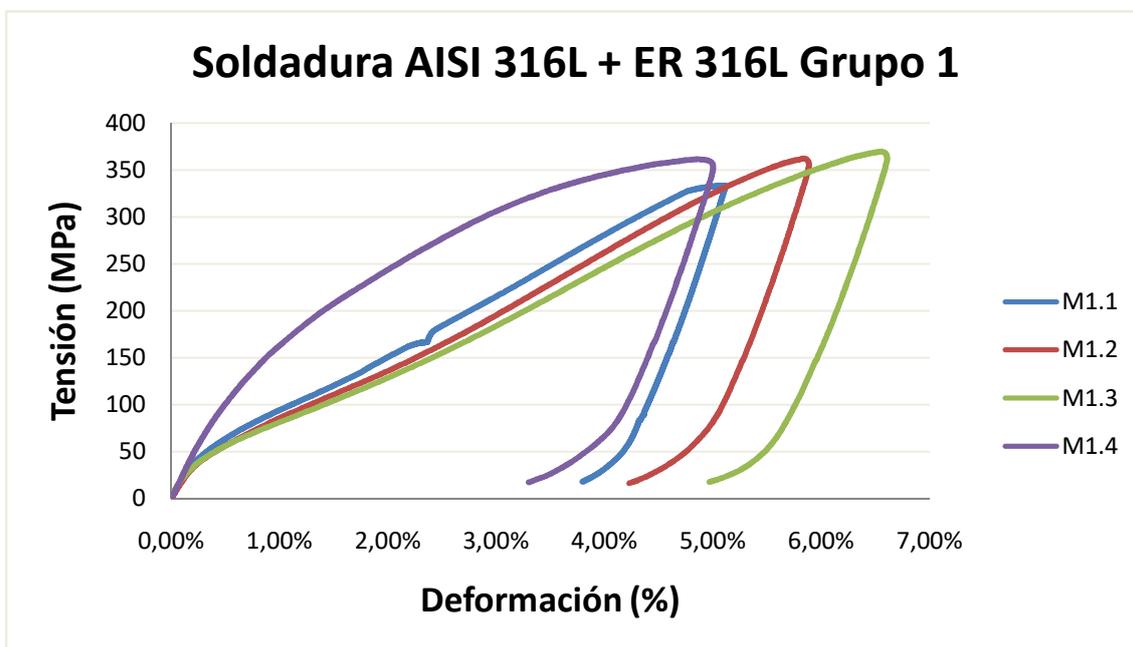


Figura 10.6: Curva tensión-deformación ensayo de tracción Grupo 1 $\sigma = 373,33$ MPa.

De forma análoga se indica en las figuras 10.7, 10.8 y 10.9, las curvas de tensión-deformación de los grupos de probetas, Grupo2, Grupo3 y Grupo4, respectivamente.

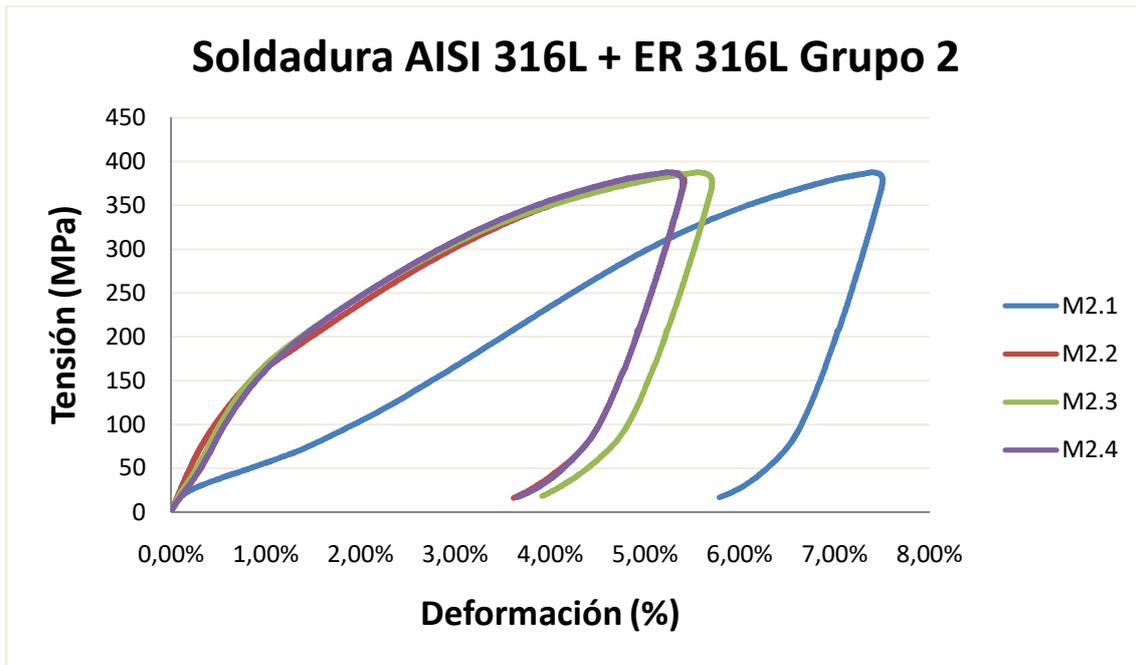


Figura 10.7: Curva tensión-deformación ensayo de tracción Grupo 2 $\sigma = 400$ MPa.

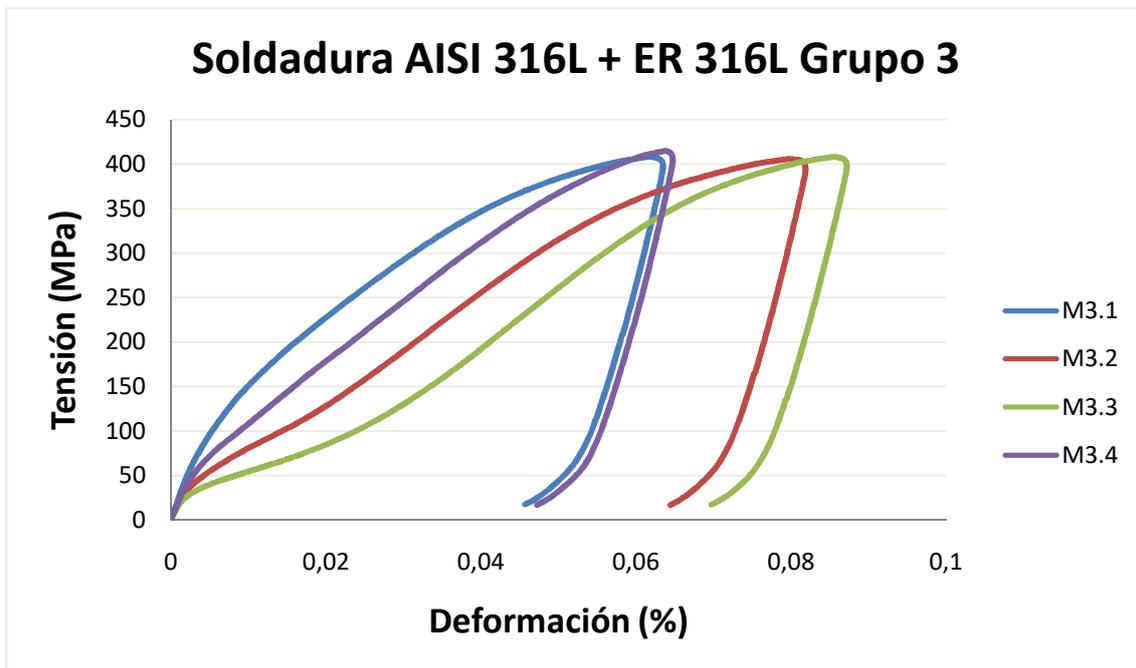


Figura 10.8: Curva tensión-deformación ensayo de tracción Grupo 3 $\sigma = 433,33$ MPa.

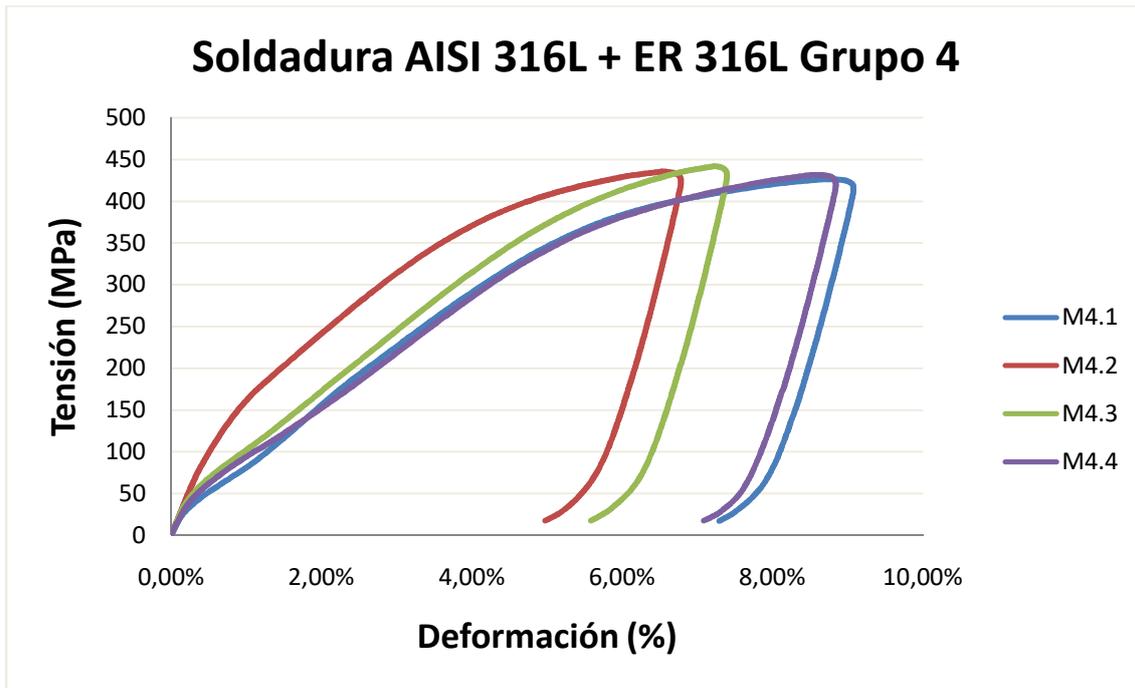


Figura 10.9: Curva tensión-deformación ensayo de tracción Grupo 4 $\sigma = 466,67$ MPa.

A continuación se resume en la tabla 10.2 las características mecánicas obtenidas del ensayo de tracción sin rotura, de las distintas probetas de los distintos grupos ensayados.

	TENSIÓN DE ROTURA (Mpa)	LÍMITE ELÁSTICO (Mpa)	MÓDULO YOUNG (Mpa)	ΔL (%)
M1.1	330,21	40,15	16.791,00	3,37
M1.2	362,11	43,27	12.615,00	4,23
M1.3	369,72	41,30	11.981,00	4,97
M1.4	361,38	124,03	17.343,00	3,30
M2.1	387,49	16,34	15.339,00	5,78
M2.2	387,15	80,45	22.278,00	3,61
M2.3	380,58	119,75	20.085,00	3,91
M2.4	383,44	119,19	18.822,00	3,65
M3.1	408,14	105,30	16.795,00	4,56
M3.2	405,65	42,01	12.021,00	6,44
M3.3	407,92	18,57	15.209,00	6,96
M3.4	414,75	24,51	20.100,00	5,07
M4.1	426,19	34,25	12.419,00	7,32
M4.2	435,00	126,89	16.981,00	4,97
M4.3	441,79	25,81	20.614,00	5,58
M4.4	431,42	31,90	16.736,00	7,08

Tabla 10.2: Características mecánicas obtenidas del ensayo de tracción sin rotura de las probetas con soldadura de acero inoxidable AISI 316L + ER 316L.

10.2. Resultados del ensayo de resistencia a la corrosión por picaduras (Pitting)

Como resultado de haber ensayado las probetas a tracción y posteriormente, haber sido sometidas a una exposición de Cloruro Férrico 20%, durante un periodo de 4 días, se indica a continuación el resultado obtenido por el recuento de picaduras de cada uno de los grupos ensayados, en la tabla 10.3. En la figura 10.10 se muestra el estado de las probetas después de haber sido sometidas al Cloruro Férrico 20%.

GRUPO	FUERZA (kN)	TENSIÓN (MPa)	Nº PICADURAS
G1	11,2	373,3	297,5
G2	12,2	400,0	310
G3	13,0	433,3	325
G4	14,0	466,7	342,5

Tabla 10.3: Nº de picaduras por grupo ensayado.



Figura 10.10: Probetas de acero inoxidable AISI 316L + ER 316L, sometidas a tracción axial y a corrosión bajo tensión en una disolución de Cloruro Férrico al 20%.

En la figura 10.11, se representa la correlación nº picaduras-tensión:

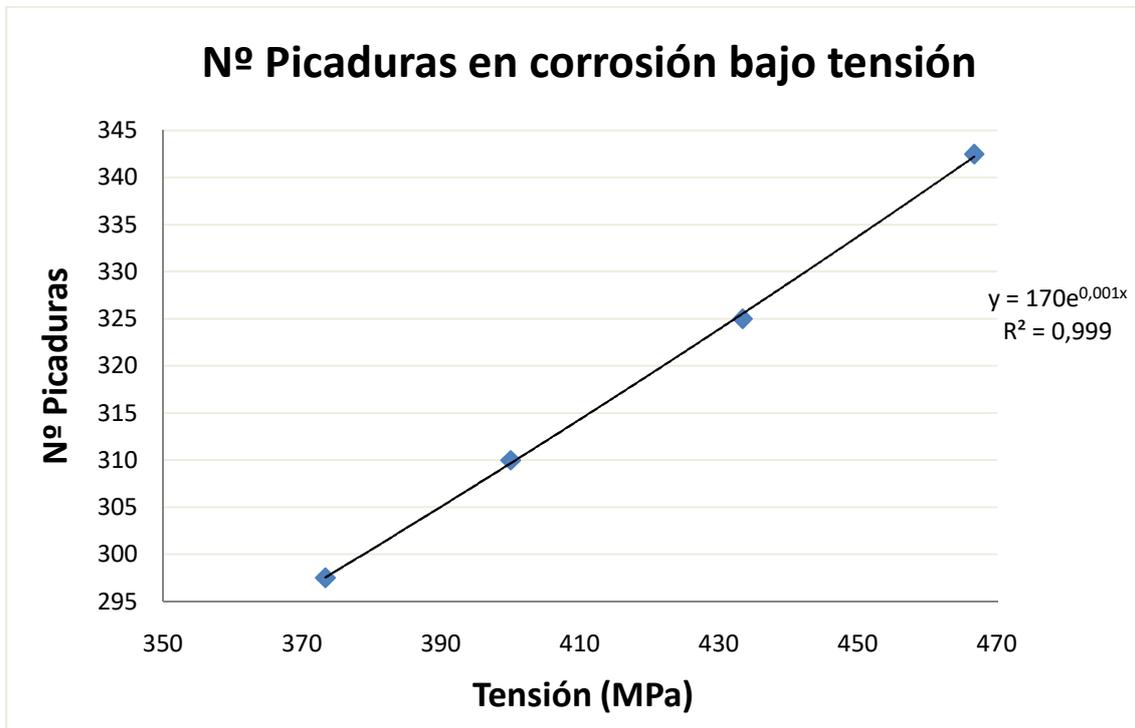


Figura 10.11: Curva nº picaduras-tensión, en la corrosión húmeda localizada por picaduras (Pitting).

10.3. Resultados del ensayo de corrosión por pérdida de peso

A continuación se detalla en la tabla 10.4, los pesos iniciales de cada una de las probetas de cada grupo de ensayo y los pesos después de su exposición en Cloruro Férrico con una concentración del 20%, durante un tiempo de 96 horas.

GRUPO	Fuerza (kN)	Tensión (Mpa)	Peso inicial (g)			
G1	11,2	373,33	9,1345	8,5407	8,7451	7,7583
G2	12	400,00	9,0695	9,0024	8,5417	8,4319
G3	13	433,33	8,8718	9,5269	9,2951	8,7894
G4	14	466,67	9,1958	8,3208	8,4827	8,3935
GRUPO	Fuerza (kN)	Tensión (Mpa)	Peso final (g)			
G1	11,2	373,33	8,9189	8,2935	8,5030	7,5907
G2	12	400,00	8,7735	8,6432	8,2472	8,1116
G3	13	433,33	8,3516	8,9544	8,8952	8,5539
G4	14	466,67	8,4507	7,7492	7,9867	8,0596
GRUPO	Fuerza (kN)	Tensión (Mpa)	Pérdida de peso (g)			
G1	11,2	373,33	0,2156	0,2472	0,2421	0,1676
G2	12	400,00	0,2960	0,3592	0,2945	0,3203
G3	13	433,33	0,5200	0,5725	0,3999	0,2355
G4	14	466,67	0,7451	0,5716	0,4960	0,3339
GRUPO	Fuerza (kN)	Tensión (Mpa)	Promedio (g)			
G1	11,2	373,33	0,2181			
G2	12	400,00	0,3175			
G3	13	433,33	0,4320			
G4	14	466,67	0,5367			

Tabla 10.4: Resultados de peso inicial, final y pérdida de peso de las probetas ensayadas.

A partir del haber determinado la pérdida de peso, podemos establecer una correlación entre la pérdida de peso sufrida por las probetas y las tensiones a las que han sido ensayadas. En la figura 10.12 se muestra la correlación pérdida de peso-tensión.

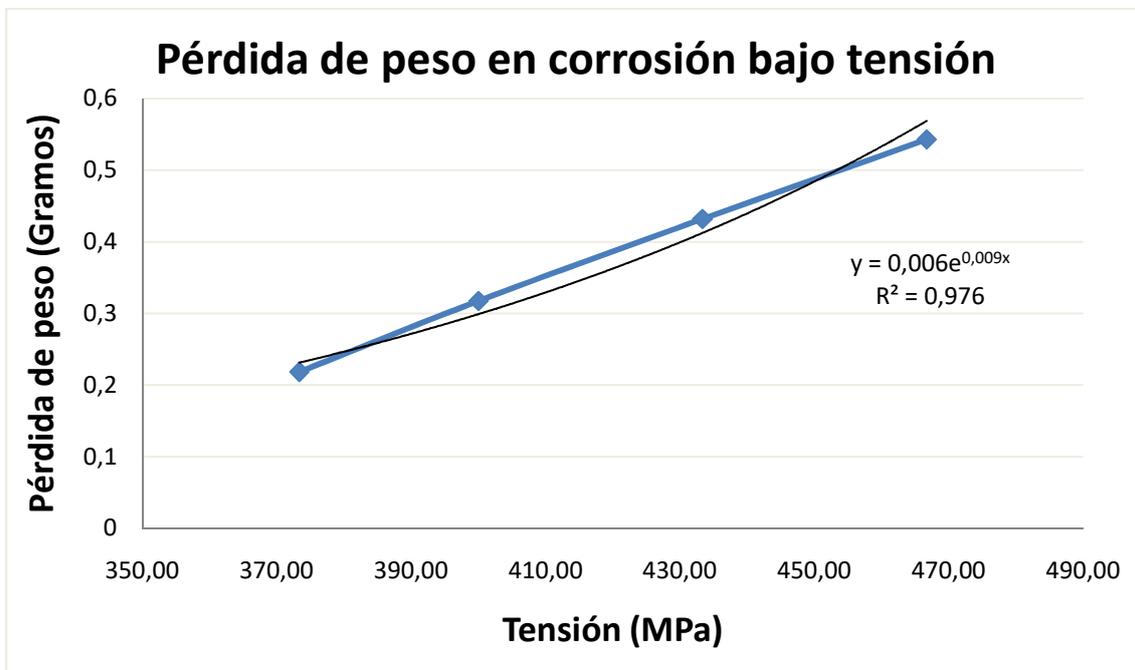


Tabla 10.12: Curva de pérdida de peso-tensión, en la corrosión bajo tensión de la soldadura AISI 316L + ER 316L.

11. Conclusiones soldadura acero inoxidable AISI 316L con material de aporte ER 316L, frente a corrosión bajo tensión.

El resultado final que se pretende demostrar de todo el ensayo para una soldadura de acero inoxidable AISI 316 + ER 316L, es que a pesar de que el material tiene propiedades específicas para tener una mayor resistencia a la corrosión, puede en ciertas condiciones no cumplir con estas, como es el caso de corrosión bajo tensión.

Después de haber determinado los valores de tensión de rotura de la soldadura de acero inoxidable estudiada, para cada grupo de ensayo, se ha procedido a deformar las probetas de los distintos grupos formados, con la finalidad de generar deformaciones en la zona plástica, y que estas producirán tensiones internas en las distintas probetas.

Partiendo de un estado inicial, en el cual la probeta que no es sometida a tensiones, no experimenta ningún cambio superficial, incluso habiendo estado sometida a una disolución de Cloruro Férrico 20%. Esto no significa que la soldadura de acero inoxidable no sufra corrosión, lo que ocurre es que lo hace a largo plazo en el tiempo.

No ocurre lo mismo con el grupo que se ha estudiado, ya que según el gráfico nº picaduras-tensión, establece una relación en la que las probetas a medida que han sido sometidas a un estado de tensión-deformación mayor, han sufrido un mayor número de picaduras cuando han sido sometidas a la combinación de tensiones y un medio corrosivo, o sea, corrosión bajo tensión. Otro dato relevante es el obtenido en relación a la pérdida de peso de las probetas, respecto su estado inicial. Se verifica que las probetas son afectadas por la corrosión, lo que se traduce en una pérdida de peso de las mismas.

La relación entre la pérdida de peso y la tensión aplicada, después de su exposición a una disolución de Cloruro Férrico 20%, también nos indica que sigue una función exponencial creciente, con lo que se verifica una mayor pérdida de peso promedio por grupo de ensayo, con el aumento de la tensión empleada en cada grupo. Ambos datos son relevantes, ya que demuestran que en la soldadura de acero inoxidable AISI 316L + ER 316L, realmente pueden acelerarse los procesos de corrosión por picaduras (Pitting), debido a que las tensiones internas en la soldadura son las que provocan la rotura de la capa pasivadora de cromo, la cual al no poderse regenerar deja sin protección al acero inoxidable y dando lugar a la formación de picaduras en la superficie. En el caso de corrosión bajo tensión, el tiempo que tarda en formarse la corrosión por picaduras es mucho menor, que cuando no se tiene la influencia de las tensiones internas.

Esto es de vital importancia, para cualquier técnico o ingeniero que en el desarrollo de sus funciones en el sector industrial, tenga la necesidad de elegir los materiales más idóneos en función de sus características mecánicas y del medio al que tiene que estar expuestos. Ejemplo de ello, son los depósitos o silos de acero inoxidable, que en

función de su localización y de los esfuerzos a los que están sometidos, como tracción o fatiga, originada por los distintos niveles de carga que puede almacenar durante el tiempo. A continuación se muestra en la figura 11.1 un silo con capacidad de 120 Toneladas.



Figura 11.1: Silo de acero inoxidable con una capacidad de 120 Toneladas.

Capítulo 2

Pliego de condiciones

12. Condiciones del puesto de trabajo

Durante la realización de un proyecto, el trabajador está expuesto a una serie de condiciones que pueden influir en su rendimiento y en su salud. Por tal motivo, es necesario regular dichas condiciones de trabajo para poder minimizar los riesgos. Las actividades realizadas son, la realización de los ensayos de tracción en el aula de ensayo de tracción, la fabricación de las probetas por soldadura eléctrica en el taller de soldadura y redacción del presente proyecto en un despacho. A continuación se detallan algunas de las condiciones del puesto de trabajo.

12.1. Lugares de trabajo

Los entornos donde se ha realizado la actividad deben regirse por lo establecido en el Real Decreto 486/1997 del 14 Abril, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo, aparte de lo establecido específicamente en el Real Decreto 488/1997 del 14 Abril, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas al trabajo con equipos que incluyen pantallas de visualización (PVD) y el Real Decreto 786/2010 del 23 Abril, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a radiaciones ópticas artificiales.

12.2. Condiciones constructivas

El diseño y las características constructivas de los lugares de trabajo deberán ofrecer seguridad frente a los riesgos de resbalones o caídas, choques o golpes contra objetos y derrumbamientos o caídas de materiales sobre los trabajadores. También deberán facilitar el control de las situaciones emergencia, en especial en caso de incendio, y posibilitar, cuando sea necesario la rápida y segura evacuación de los trabajadores.

12.3. Orden, limpieza y mantenimiento. Señalización

El orden, la limpieza y el mantenimiento de los lugares de trabajo deberán ajustarse a lo dispuesto en el anexo II, del presente Real Decreto. La señalización de los lugares de trabajo deberá cumplir con lo dispuesto en el Real Decreto 485/1997, de 14 Abril.

12.4. Instalaciones de servicio y protección

Las instalaciones de servicio y protección de los lugares de trabajo a las que se refiere en el apartado 2 del artículo 2, deberán cumplir las disposiciones mínimas establecidas en el presente Real Decreto, así como las que se deriven de las reglamentaciones específicas de seguridad que resulten de aplicación.

12.5. Condiciones ambientales

Las condiciones ambientales no deberán suponer un riesgo para la seguridad y salud de los trabajadores. A tal fin, dichas condiciones ambientales y, en particular, las condiciones termohigrométricas deberán ajustarse a los establecido en el anexo III.

12.6. Iluminación

La iluminación deberá permitir que los trabajadores dispongan de condiciones de visibilidad adecuadas para poder circular los mismos y desarrollar en ellos sus actividades sin riesgo para su seguridad y salud.

12.7. Ergonomía del puesto de trabajo

El diseño del puesto de trabajo está directamente vinculado con los problemas posturales. Para el caso en que las posiciones de trabajo sean estáticas y prolongadas en el tiempo, los problemas posturales pueden verse agravados por el mal diseño del puesto de trabajo. Por lo que, es muy importante que el diseño del puesto de trabajo se adapte a las características y fisiológicas de las personas.

12.8. Ruido

En el Real Decreto 1316/1989 del 27 de Octubre, se establece que el empresario debe evaluar la exposición de los trabajadores al ruido, con la finalidad de determinar si los límites permitidos son superados y en su defecto aplicar las medidas oportunas. En los lugares de trabajo donde se emplean PVD's los niveles de ruido no son

excesivamente elevados, pero si cabe la posibilidad de de niveles medios que pueden molestar la atención de los trabajadores. Por el contrario en los talleres de soldadura si es posible que los niveles de ruido sean mayores y por eso la necesidad de evaluar la exposición y aplicar las medidas necesarias.

12.9. Material y locales de primeros auxilios

Los lugares de trabajo dispondrán del material y, en su caso, de los locales necesarios para la prestación de primeros auxilios a los trabajadores accidentados, según lo establecido en el anexo VI.

13. Condiciones de los recursos materiales

Para llevar a cabo la parte experimental de los ensayos requeridos por el presente proyecto, se hace necesario el uso de recursos materiales. Estos recursos pueden ser clasificados en dos grupos: recursos materiales para equipamiento y recursos materiales para elementos de protección.

13.1. Soldadura TIG de chapas de acero inoxidable AISI 316L con varilla de aporte ER316L

Para el proceso de soldadura de las probetas mediante soldadura TIG, se han empleado los recursos materiales para equipamiento siguientes:

- Equipo de soldadura TIG, de la marca Fronius Transtig 1700
- Antorcha o pistola TIG con electrodo de Tungsteno
- Botella de gas Argón
- Chapa de 200 mm x 100 mm acero inoxidable AISI 316L
- Varilla de aporte de acero inoxidable ER316L
- Banco de trabajo
- Banqueta de trabajo
- Cizalladora manual
- Tornillo de banco
- Martillo
- Sargento de apriete
- Amoladora angular Bosch GWS 7-115

Los recursos materiales para elementos de protección son:

- Pantalla de soldadura
- Guantes de cuero
- Polainas
- Mandil
- Gafas de protección
- Bata de trabajo

13.2. Obtención de probetas por corte de chapas soldadas de acero inoxidable AISI 316L con varilla de aporte ER 316L

Para la obtención de las probetas se ha realizado un proceso de corte de las chapas soldadas por soldadura TIG, donde se han empleado los siguientes recursos materiales para equipamiento:

- Cizalladora manual

Los recursos materiales para elementos de protección son:

- Guantes de trabajo
- Gafas de protección
- Bata de trabajo

13.3. Ensayo de tracción de las probetas soldadas de acero inoxidable AISI 316L con varilla de aporte ER 316L

Para realizar el ensayo de tracción de las probetas obtenidas se han empleado los recursos materiales para equipamiento siguientes:

- Máquina de tracción de la marca IBERTEST
- Ordenador
- Mordazas

Los recursos materiales para elementos de protección son:

- Gafas de seguridad
- Guantes de seguridad
- Bata de trabajo

13.4. Ensayo de corrosión de las probetas soldadas de acero inoxidable AISI 316L con varilla de aporte ER 316L

Para realizar el ensayo de corrosión de las probetas previamente ensayadas a tracción, se han empleado los recursos materiales para equipamiento siguientes:

- Bandeja
- Cloruro férrico con una concentración del 20%
- Vitrina de gases marca Flores Valles
- Balanza de precisión KERN 770
- Microscopio Olympus B061
- Alcohol etílico
- Secador por corriente de aire

Los recursos materiales para elementos de protección son:

- Bata de trabajo
- Guantes de seguridad
- Gafas de seguridad

14. Condiciones de los recursos informáticos

Para realizar los trabajos requeridos en el presente proyecto, es necesario el uso de recursos informáticos. Estos recursos informáticos se pueden dividir en dos grupos: hardware y software.

14.1. Condiciones del hardware

Como hardware han sido empleados un equipo portátil y un ordenador de sobremesa correspondiente a la máquina de ensayos de tracción de la marca IBERTEST. El ordenador de sobremesa que está interconectado a la máquina de ensayos de tracción, ha sido empleado para la adquisición de los datos durante la realización de los distintos ensayos de tracción, para posteriormente realizar su tratamiento y análisis. El equipo portátil ha sido empleado para la realización del presente proyecto, en su redacción, elaboración de tablas, tratamiento de imágenes y elaboración de gráficos.

14.1.1 Equipo portátil: Asus K55VM-SX077V

- Procesador: Intel Core i7 3610QM, 2.3GHz
- Número de procesadores: 4
- Memoria RAM: 6GB
- Tarjeta gráfica: Nvidia Geforce GT 630M
- Unidad de almacenamiento: Disco duro SSD 256 GB
- Monitor: 15.6”, resolución 1366 x 768
- OS: Windows 10 Pro
- Arquitectura: 64 bits

14.1.2 Equipo de sobremesa: Dell Inspiron Desktop

- Procesador: Intel Core i3 7610U, 2.1GHz
- Número de procesadores: 4
- Memoria RAM: 2GB
- Tarjeta gráfica: Intel (R) HD Graphics 4000
- Unidad de almacenamiento: Disco duro 150 GB
- Monitor: 15.6”, resolución 1366 x 768
- OS: Windows XP Professional
- Arquitectura: 32 bits

14.2. Condiciones del software

El software empleado para la adquisición de los datos del ensayo de tracción, es el programa WinTest32, propiedad de la empresa S.A.E. IBERTEST. La versión del software es la 2.17.2.

15. Normativa aplicada

AENOR. 2004. UNE-EN ISO 15607:2003. Especificación y cualificación de procedimientos de soldeo para los materiales metálicos. Reglas generales.

AENOR. 2011. UNE-EN ISO 6947:2011. Soldaduras. Posiciones de trabajo. Definición de los ángulos de pendiente y de rotación.

AENOR. 2005. UNE-EN ISO 15609-1:2004. Especificación y cualificación de procedimientos de soldeo para los materiales metálicos. Especificación del procedimiento de soldeo. Parte 1: Soldero por arco.

NTP 494. Soldadura elèctrica al arco: normes de seguretat.

NTP 153. Cizalla de guillotina per a metal.

ASTM E8 / E8M-16ae1. Mètodes de prova estàndar per a proves de tensió de materials metàl·lics.

ASTM G48-11(2015). Mètodes de prova estàndar per a la resistència a la corrosió per picadures i grietas de acers inoxidable i aleacions relacionades mitjançant l'ús de solució de clorur fèrric.

Capítulo 3

Presupuesto

A continuación se indica el coste económico del presente proyecto, el cual se divide en tres partes que son, materiales, mano de obra y medios auxiliares.

16. Coste de materiales

En el cuadro siguiente se indican los costes de los materiales empleados en el proyecto presente:

CÓDIGO	UNIDADES	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (€/Ud) Y (€/Litro)	IMPORTE (€)
16.1	Ud	CHAPA DE ACERO INOXIDABLE AISI 316L 200X100X1,5 mm	8	21,98	175,84
16.2	Ud	VARILLA DE APORTE ACERO INOXIDABLE AISI ER316L 1000X1,6 mm	3	0,80	2,40
16.3	Litros	GAS ARGÓN	540	0,06	32,40
16.4	Ud	ELECTRODO TUNSTENO TIG	1	0,86	0,86
16.5	Ud	DISCO DE DESBASTE	1	5,76	5,76
16.6	Litros	CLORURO FÉRRICO	1	13,25	13,25
				TOTAL	230,51 €

17. Coste de mano de obra

En el cuadro siguiente se indican los costes de mano de obra empleados en el proyecto presente:

CÓDIGO	UNIDADES	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (€/Hora)	IMPORTE (€)
17.1	Horas	PREPARACIÓN DE PIEZAS Y PUESTA EN MARCHA EQUIPO SOLDADURA	0,4	105,00	42,00
17.2	Horas	SOLDADURA TIG ACERO INOXIDABLE AISI 316L	1,5	105,00	157,50
17.3	Horas	DESBASTE MEDIANTE AMOLADORA	2,5	105,00	262,50
17.4	Horas	CORTE CON CIZALLA	1,3	105,00	136,50
17.5	Horas	PREPARACIÓN DE PROBETAS Y PUESTA EN MARCHA MÁQUINA DE TRACCIÓN	0,75	105,00	78,75
17.6	Horas	ENSAYO DE PROBETAS A TRACCIÓN	2,3	105,00	241,50
17.7	Horas	PREPARACIÓN DE PROBETAS PARA ENSAYO DE CORROSIÓN	0,75	105,00	78,75
17.8	Horas	ENSAYO DE PROBETAS A CORROSIÓN	1,5	105,00	157,50
				TOTAL	1.155,00 €

18. Coste de medios auxiliares

En el cuadro siguiente se indican los costes de medios auxiliares empleados en el proyecto presente:

CÓDIGO	UNIDADES	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (€/Hora)	IMPORTE (€)
18.1	Horas	EQUIPO DE SOLDADURA FRONIUS TRANSTIG 1700	3	67,00	201,00
18.2	Horas	AMOLADORA ANGULAR BOSCH GWS 7-115	2,5	14,00	35,00
18.3	Horas	CIZALLA	1,3	12,00	15,60
18.4	Horas	MÁQUINA ENSAYOS DE TRACCIÓN INSTRON 4204	4	150,00	600,00
18.5	Horas	BALANZA PRECISIÓN KERN 770	1	16,00	16,00
18.6	Horas	MICROSCOPIO OLYMPUS B061	2,5	35,00	87,50
18.7	Horas	VITRINA DE GASES FLORES VALLES	96	2,25	216,00
TOTAL					1.171,10 €

19. Presupuesto final

En el cuadro siguiente se resumen todos los costes mencionados anteriormente y se indica el coste total del presupuesto, de la elaboración del presente proyecto.

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	IMPORTE (€)
16	PRESUPUESTO MATERIALES	230,51
17	PRESUPUESTO MANO DE OBRA	1155,00
18	PRESUPUESTO MEDIOS AUXILIARES	1171,10
TOTAL		2.556,61 €

El presupuesto final asciende a la cifra de **dos mil quinientos cincuenta y seis con sesenta y un céntimos**.

Bibliografía

Libros

- [11] Manuel Reina Gómez.: Soldadura de los aceros. Aplicaciones. 4ª Edición. 2003.
- [24] Carlos Ferrer Giménez, Vicente Amigó Borrás.: Tecnología de materiales. Universidad Politécnica de Valencia, 2003.
- [25] Cristóbal López Gálvez, Francisco Ramón Orozco Roldán.: Soldadura en atmósfera protegida, Paraninfo, 2013.
- [26] Donald R. Askeland.: Ciencia e Ingeniería de los materiales. Paraninfo. 2001.
- [27] James F. Shackelford.: Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros. Prentice-Hall. 2010.

Web

- [1] <https://es.slideshare.net/JNAcerosPeru/breve-historia-del-acero-inoxidable>
- [2] <https://www.mipsa.com.mx/dotnetnuke/Sabias-que/Clasificacion-del-acero-inoxidable>
- [3] <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3319/55868-4.pdf?sequence=4>
- [4] <https://kuzudecoletaje.es/diferentes-tipos-acero-inoxidable/>
- [5] <http://www.indura.cl/Descargar/Manual%20de%20Aceros%20Inoxidables?path=%2Fcontent%2Fstorage%2Fcl%2Fbiblioteca%2Fd7a1a8fe99fe4b6a9fbed6412df7e93c.pdf>
- [6] <https://www.scielo.sa.cr/pdf/tem/v28n3/0379-3982-tem-28-03-00127.pdf>
- [7] <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn48.html>
- [8] <http://www.indura.cl/Descargar/Manual%20de%20Aceros%20Inoxidables%20para%20Soldadores?path=%2Fcontent%2Fstorage%2Fcl%2Fbiblioteca%2Ff5b79aa945a24c64ade8b60782765dea.pdf>
- [9] <http://www.cientificosaficionados.com/libros/solinox1.pdf>
- [10] <http://ahmadzulfiqardaniel.blogspot.com/p/principles-of-shielded-metal-arc.html>
- [12] <http://miraferro.es/?p=184>
- [13] <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn52.html>

- [14] <https://ingenieriamecanicaymaas.blogspot.com/2016/08/proceso-de-soldadura-tig.html>
- [15] <http://www.carbuos.com/~media/Files/PDF/microsites/welders-handbook/231-18-039-ES-Welders-ManualDelSoldador.pdf>
- [16] <https://www.demaquinasyherramientas.com/soldadura/elegir-seleccionar-comprar-antorcha-tig>
- [17] <http://soldadurayestructuras.com/proceso-gmaw.html>
- [18] <https://www.slideserve.com/cate/proceso-mig-mag-gmaw-gas-metal-arc-welding>
- [19] <https://docplayer.es/26439889-Soldaduras-especiales-mig-mag-y-tig.html>
- [20] <https://www.demaquinasyherramientas.com/wp-content/uploads/2015/07/Figura-4-Configuraciones-de-boquilla-gatillo-y-cuello-para-pistolas-MIGMAG.jpg>
- [21] http://www.mecapedia.uji.es/ensayo_de_traccion.htm
- [22] http://www.mecapedia.uji.es/modulo_de_elasticidad.htm
- [23] <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/91772/fichero/TFG-1772-GARCIA.pdf>