



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE
CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**“RELACIÓN, MICROESTRUCTURA/PROPIEDAD
EN LA SOLDADURA GTAW ENTRE ACEROS
INOXIDABLES Y ACEROS AL CARBONO”**

VILLAVICENCIO CEVALLOS JULIO CÉSAR

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:
INGENIERO MECÁNICO

RIOBAMBA – ECUADOR

2010

Espoch

Facultad de Mecánica

CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TESIS

CONSEJO DIRECTIVO

Abril, 12 de 2010

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

JULIO CÉSAR VILLAVICENCIO CEVALLOS

Titulada:

**“RELACIÓN, MICROESTRUCTURA/PROPIEDAD EN LA SOLDADURA
GTAW ENTRE ACEROS INOXIDABLES Y ACEROS AL CARBONO”**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Ing. Geovanny Novillo A.
DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

Ing. Mario Pástor
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Iván Cantos
ASESOR DE TESIS

CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: JULIO CÉSAR VILLAVICENCIO CEVALLOS

TÍTULO DE LA TESIS: “RELACIÓN, MICROESTRUCTURA/PROPIEDAD EN LA SOLDADURA GTAW ENTRE ACEROS INOXIDABLES Y ACEROS AL CARBONO”

Fecha de Examinación: Abril, 12 de 2010.

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
ING. Geovanny Novillo (Presidente Trib. Defensa)			
ING. Mario Pástor (Director de Tesis)			
ING. Iván Cantos (Asesor)			

* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

RECOMENDACIONES: _____

El Presidente del Tribunal quien certifica al Consejo Directivo que las condiciones de la defensa se han cumplido.

f) Presidente del Tribunal

DERECHOS DE AUTORÍA

El trabajo de grado que presento, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teóricos - científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad del autor. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

f) Julio César Villavicencio Cevallos

AGRADECIMIENTO

A Dios por darme la oportunidad de vivir y alcanzar un objetivo muy importante, a mis padres y familia por brindarme su incondicional apoyo y enseñarme a luchar sobre todo por los caminos difíciles. Sin ustedes esto nunca hubiese sido posible

Un día una persona muy importante me dijo: “el que quiere ser, es”, gracias padres y abuelitos su ejemplo me mostró el mejor camino y me enseñó que cada persona es libre de vivir y decidir la manera en que desea alcanzar sus sueños.

J.C. Villavicencio Cevallos

DEDICATORIA

Para mis padres, familia y las todas las personas que me dieron su aliento, su apoyo fue y seguirá siendo fundamental en mi vida. Todo el esfuerzo que di en este trabajo fue por ustedes.

J.C. Villavicencio Cevallos

TABLA DE CONTENIDOS

<u>CAPÍTULO</u>	<u>PÁGINA</u>
1. INTRODUCCIÓN	
1.1 Antecedentes	1
1.2 Objetivos	1
1.3 Justificación.....	2
2. MARCO TEÓRICO	
2.1 Acero	4
2.2 Aceros inoxidable.....	5
2.2.1 Influencia de los elementos de aleación	5
2.2.2 Composición de los aceros inoxidable.....	8
2.2.3 Aceros inoxidable ferrítico.....	8
2.2.4 Aceros inoxidable austenítico.....	14
2.3 Soldadura por arco de tungsteno y gas	21
2.3.1 Principios de funcionamiento	21
2.3.2 Equipo	21
2.3.3 Tipos de gases protectores	27
2.3.4 Tasas de flujo recomendadas.....	28
3. DISPOSITIVO DE TRASLACIÓN LINEAL	
3.1 Configuración del prototipo	29
3.2 Diseño de elementos del dispositivo.....	30
3.2.1 Tornillo.....	30
3.2.2 Guías.....	42
3.2.3 Deflexión en ejes guía.....	46
3.3 Circuito electrónico de control de velocidad	47
3.4 Funcionamiento del dispositivo	50
4. EXPERIMENTACIÓN	
4.1 Preparación de los materiales a soldar.....	51
4.2 Soldadura GTAW de diferente material	53
4.3 Metalurgia de la soldadura	58
4.3.1 Soldadura del acero inoxidable ferrítico AISI 430.....	59

4.3.2	Soldadura del acero inoxidable austenítico AISI 304	62
4.3.3	Microestructura del acero de bajo contenido de carbono AISI 1008	66
4.3.4	Soldadura disímil: AISI 1008 – AISI 304	67
4.3.5	Soldadura disímil: AISI 1008 – AISI 430	72
4.3.6	Soldadura disímil: AISI 430 – AISI 304	76
4.4	Perfiles de dureza	79
4.5	Propiedades mecánicas de las soldaduras	88

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

5.1	Análisis de las microestructuras	96
5.1.1	Soldadura del acero inoxidable ferrítico AISI 430	96
5.1.2	Soldadura del acero inoxidable austenítico AISI 304	98
5.1.3	Soldadura disímil: AISI 1008-AISI 304	101
5.1.4	Soldadura disímil: AISI 1008-AISI 430	103
5.1.5	Soldadura disímil: AISI 430-AISI 304	105
5.2	Análisis de las propiedades mecánicas	107
5.2.1	Soldadura del acero inoxidable ferrítico AISI 430	107
5.2.2	Soldadura del acero inoxidable austenítico AISI 304	108
5.2.3	Soldadura disímil: AISI 1008-AISI 304	110
5.2.4	Soldadura disímil: AISI 1008-AISI 430	111
5.2.5	Soldadura disímil: AISI 430-AISI 304	113
5.3	Relación entre microestructura y propiedades	114
5.4	Discusión de resultados	116

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1	Conclusiones	118
6.2	Recomendaciones	119

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

PLANOS

LISTA DE TABLAS

<u>TABLA</u>		<u>PÁGINA</u>
2.1	Porcentaje de elementos en aceros de bajo contenido de carbono.....	5
2.2	Composición química del acero inoxidable ferrítico AISI 430	9
2.3	Propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 430.....	10
2.4	Composición química del acero inoxidable austenítico AISI 304	15
2.5	Propiedades mecánicas del acero inoxidable austenítico AISI 304	15
2.6	Tipos de solidificación, reacciones y microestructuras resultantes	16
2.7	Comparación de corrientes entre torchas enfriadas con gas y agua	24
2.8	Rangos típicos de corriente para electrodos de tungsteno	25
3.1	Volumen y radio de giro para el acople	32
3.2	Volumen y radio de giro para el tornillo	34
3.3	Masa e inercia del tornillo	34
3.4	Aceleración angular y torque requerido para diferentes tiempos	35
3.5	Peso de los elementos que conforman el conjunto montado sobre el tornillo principal	37
3.6	Torques para diferentes voltajes en el motor de CD	39
3.7	Esfuerzo torsor en las diferentes dimensiones del tornillo A	40
3.8	Deflexiones en el tornillo y eje	47
3.9	Deflexiones máximas y mínimas recomendadas.....	47
3.10	Entradas al circuito	49
4.1	Dimensiones de la ranura en las placas de retención.....	53
4.2	Composición química del material aportado a las soldaduras	54
4.3	Cr y Ni equivalente para los materiales utilizados	54
4.4	Ataque electrolítico para aceros inoxidables	58
4.5	Tamaño de grano ASTM del acero inoxidable AISI 430	60
4.6	Composición del acero inoxidable 430	61
4.7	Tamaño de grano ASTM del acero inoxidable AISI 304	64
4.8	Tamaño de grano ASTM del acero de bajo carbono AISI 1008	67
4.9	Propiedades mecánicas de la junta AISI 430-AISI 430	89
4.10	Propiedades mecánicas de la junta AISI 304-AISI 304	91
4.11	Propiedades mecánicas de la junta AISI 1008-AISI 304.....	91
4.12	Propiedades mecánicas de la junta AISI 1008-AISI 430.....	93
4.13	Propiedades mecánicas de la junta AISI 430-AISI 304.....	95
5.1	Microdurezas VHN de la junta AISI 430-AISI 430	107
5.2	Límite de fluencia para la soldadura AISI 430-AISI 430	107

5.3	Límite de fluencia para la soldadura AISI 304-AISI 304	109
5.4	Microdureza VHN del acero AISI 304 en la junta AISI 1008-AISI 304	110
5.5	Microdureza VHN del acero AISI 1008 en la junta AISI 1008-AISI 304	110
5.6	Límite de fluencia para la soldadura AISI 1008-AISI 304	110
5.7	Microdureza VHN del acero AISI 430 en la junta AISI 1008-AISI 430	111
5.8	Microdureza VHN del acero AISI 1008 en la junta AISI 1008-AISI 430	112
5.9	Límite de fluencia para la soldadura AISI 1008-AISI 430	112
5.10	Microdureza VHN del acero AISI 430 en la junta AISI 430-AISI 304	113
5.11	Microdureza VHN del acero AISI 304 en la junta AISI 430-AISI 304	113
5.12	Límite de fluencia para la soldadura AISI 430-AISI 304	113
5.13	Límites de fluencia de las diferentes soldaduras	114
5.14	Resumen y características importantes de las soldaduras	115
5.15	Características de los ensayos de doblado	116
5.16	Energías de soldadura	116

LISTA DE FIGURAS

<u>FIGURA</u>	<u>PÁGINA</u>
2.1	Diagrama Hierro-Cromo..... 6
2.2	Diagrama Fe-Cr-Ni a temperatura ambiente 7
2.3	Diagrama de Schaeffler 8
2.4	Variación de la resiliencia en función del contenido de carbono y de cromo 9
2.5	Diagrama de Balmforth 11
2.6	Diagrama de fase 17%Cr 12
2.7	Zona de fusión en un acero inoxidable ferrítico AISI 430 12
2.8	Zona de fusión y ZAC en un acero AISI 430 13
2.9	Tipos de solidificación para el diagrama de fase pseudobinario 15
2.10	Microestructura en la ZF resultado de una solidificación tipo AF 17
2.11	Solidificación FA: Esquema de la ferrita columnar y su microestructura en la ZF .. 18
2.12	Solidificación FA: Esquema de la ferrita tipo placa y microestructura en la ZF 18
2.13	Ferrita formada en las fronteras de grano austenítico en la ZAC 19
2.14	Diagramas de fase: Fe-18Cr-10Ni-1.5Mn-0.5Si-0.04N, C variable 20
2.15	Diagramas de fase: Fe-10Ni-1.5Mn-0.5Si-0.04N, Cr variable 20
2.16	Representación del proceso soldadura GTAW 21
2.17	Características del tipo de corriente usada para soldadura TIG 26
3.1	Configuración del dispositivo 29
3.2	Tipos de rosca 31
3.3	Esquema del tornillo 32
3.4	Acople 33
3.5	Tornillo 33
3.6	Visualización del conjunto..... 36
3.7	Grafica Esfuerzo-Tiempo, fluctuación completamente invertida 42
3.8	Vista lateral del conjunto, ubicación del peso total y el momento provocado 43
3.9	Doble empotramiento: carga central 44
3.10	Diagrama de momento 44
3.11	Deflexión en el tornillo 46
3.12	Deflexión en el eje 46
4.1	Angulo de apertura entre placas para soldadura semiautomática GTAW 52
4.2	Plantilla de soldadura 53
4.3	Posición de los materiales en el D. de Schaeffler, según Cr y Ni equivalente..... 54
4.4	Esquema para el cálculo del porcentaje de dilución del material base 54
4.5	D. de Schaeffler de la junta AISI 304, 33% de dilución, aporte ER 316L 56

4.6	D. de Schaeffler de la junta AISI 430, 33% de dilución, aporte ER 316L	56
4.7	D. de Schaeffler de la junta AISI 304-AISI 430, 33% de dilución, aporte ER 316L ..	57
4.8	D. de Schaeffler de la junta AISI 1008-AISI 304, 33% de dilución, aporte ER 316L	57
4.9	D. de Schaeffler de la junta AISI 1008-AISI 430, 33% de dilución, aporte ER 316L	58
4.10	Microestructura de un acero inoxidable AISI 430. Ampliación 200x	59
4.11	Microestructura de un acero inoxidable AISI 430. Ampliación 400x	59
4.12	Zona de fusión de la junta AISI 430-AISI 430. Ampliación 25x	60
4.13	Zona de fusión de la junta AISI 430-AISI 430. Ampliación 50x	60
4.14	Zona de fusión de la junta AISI 430-AISI 430. Ampliación 100x	60
4.15	Ubicación de la junta soldada AISI 430-AISI 430, en el diagrama de Balmforth	61
4.16	ZAC en la soldadura de un acero inoxidable AISI 430. Ampliación 25x	62
4.17	Frontera de fusión en la junta AISI 430-AISI 430. Ampliación 50x	62
4.18	Acero inoxidable austenítico 304. Ampliación 50x	63
4.19	Acero inoxidable austenítico 304. Ampliación 100x	63
4.20	Microestructura de una placa de acero inoxidable 304 completamente austenítico	63
4.21	Microestructura de una placa de acero inoxidable 304 con residuos de ferrita	63
4.22	Intercara entre la ZF y la ZAC en la junta AISI 304-AISI 304. Ampliación 100x	64
4.23	Zona de fusión en la junta AISI 304-AISI 304. Ampliación 100x	64
4.24	Zona de fusión en la junta AISI 304-AISI 304. Ampliación 100x	65
4.25	Zona de fusión en la junta AISI 304-AISI 304. Ampliación 400x	65
4.26	ZAC en la junta AISI 304-AISI 304. Ampliación 100x	65
4.27	ZAC en la junta AISI 304-AISI 304. Ampliación 200x	65
4.28	Formación de ferrita en la ZAC en la junta AISI 304-AISI 304. Ampliación 100x	66
4.29	Microestructura del acero AISI 1008. Ampliación 100x	66
4.30	Microestructura del acero AISI 1008. Ampliación 400x	66
4.31	Acero de bajo contenido de carbono AISI 1008. Ampliación 250 x	67
4.32	D. de Schaeffler de la junta AISI 1008-AISI 304. 33% de dilución, aporte ER 316L	68
4.33	Zona de fusión en la junta AISI 1008-AISI 304. Ampliación 50x	68
4.34	Zona de fusión en la junta AISI 1008-AISI 304. Ampliación 100x	68
4.35	Frontera de fusión en la junta AISI 1008-AISI 304. Ampliación 100x	69
4.36	Frontera de fusión en la junta AISI 1008-AISI 304. Ampliación 200x	69
4.37	Frontera de fusión en la junta AISI 1008-AISI 304. Ampliación 100x	70
4.38	Frontera de fusión en la junta AISI 1008-AISI 304. Ampliación 200x	70
4.39	Diagrama CCT para el acero AISI 1010	70
4.40	Curvas del ciclo térmico para el acero AISI 1008 en la junta AISI 1008-AISI 304 ..	71
4.41	Curvas del ciclo térmico sobre el diagrama CCT	71
4.42	ZAC en el acero AISI 1008 en la junta AISI 1008-AISI 304. Ampliación 100x	72
4.43	ZAC en el acero AISI 1008 en la junta AISI 1008-AISI 304. Ampliación 200x	72
4.44	ZAC en el acero inoxidable AISI 304 en la junta AISI 1008-AISI 304. Ampliación 100x	72

4.45	ZAC del acero inoxidable AISI 304 en la junta AISI 1008-AISI 304. Ampliación 200x	72
4.46	D. de Schaeffler de la junta AISI 1008-AISI 430. 33% de dilución, aporte ER 316L	73
4.47	Zona de fusión en la junta AISI 1008-AISI 430. Ampliación 100x	73
4.48	Zona de fusión en la junta AISI 1008-AISI 430. Ampliación 100x	73
4.49	Frontera de fusión en la junta AISI 1008-AISI 430. Ampliación 100x	74
4.50	Frontera de fusión en la junta AISI 1008-AISI 430. Ampliación 100x	74
4.51	Frontera de Fusión en la junta AISI 1008-AISI 430. Ampliación 50x	74
4.52	Frontera de Fusión en la junta AISI 1008-AISI 430. Ampliación 100x	74
4.53	Curvas del ciclo térmico para el acero AISI 1008 en la junta AISI 1008-AISI 430	75
4.54	Curvas del ciclo térmico sobre el diagrama CCT	75
4.55	ZAC en el acero AISI 1008 de la junta AISI 1008-AISI 430. Ampliación 100x	75
4.56	ZAC en el acero AISI 1008 de la junta AISI 1008-AISI 430. Ampliación 400x	75
4.57	ZAC del acero inoxidable AISI 430 en la junta AISI 1008-AISI 430. Ampliación 50x	76
4.58	ZAC del acero inoxidable AISI 430 en la junta AISI 1008-AISI 430. Ampliación 50x	76
4.59	D. de Schaeffler de la junta AISI 304-AISI 430. 33% de dilución, aporte ER 316L	77
4.60	Zona de fusión en la junta AISI 304-AISI 430. Ampliación 50x	77
4.61	Zona de fusión en la junta AISI 304-AISI 430. Ampliación 100x	77
4.62	Zona de fusión en la junta AISI 304-AISI 430. Ampliación 100x	77
4.63	Zona de fusión en la junta AISI 304-AISI 430. Ampliación 200x	77
4.64	Zona de fusión en la junta AISI 304-AISI 430. Ampliación 400x	78
4.65	Zona de fusión en la junta AISI 304-AISI 430. Ampliación 50x	78
4.66	Frontera de fusión en la junta AISI 304-AISI 430. Ampliación 50x	78
4.67	Frontera de fusión en la junta AISI 304-AISI 430. Ampliación 50x	79
4.68	Frontera de fusión en la junta AISI 304-AISI 430. Ampliación 200x	79
4.69	ZAC del acero inoxidable AISI 430 en la junta AISI 304-AISI 430. Ampliación 50x	79
4.70	ZAC del acero inoxidable AISI 430 en la junta AISI 304-AISI 430. Ampliación 50x	79
4.71	Microdureza VHN para la junta AISI 430-AISI 430	80
4.72	Microdureza VHN para la junta AISI 304-AISI 304	81
4.73	Microdureza VHN para la junta AISI 1008-AISI 304	82
4.74	Microdureza VHN para la junta AISI 1008-AISI 304	83
4.75	Microdureza VHN para la junta AISI 1008-AISI 304	83
4.76	Microdureza VHN para la junta AISI 1008-AISI 430	84
4.77	Microdureza VHN para la junta AISI 1008-AISI 430	85
4.78	Microdureza VHN para la junta AISI 1008-AISI 430	85
4.79	Microdureza VHN para la junta AISI 304-AISI 430	86
4.80	Microdureza VHN para la junta AISI 304-AISI 430	87
4.81	Dureza VHN vs. Distancia para la junta AISI 430-AISI 304	88
4.82	Especímenes para tracción y doblado de cara y raíz	88
4.83	Diagrama Esfuerzo vs. Deformación para la junta AISI 430-AISI 430	89
4.84	Doblado de cara para la junta AISI 430-AISI 430	90

4.85	Doblado de raíz para la junta AISI 430-AISI 430	90
4.86	Diagrama Esfuerzo vs. Deformación para la junta AISI 304- AISI 304	90
4.87	Doblado de cara para la junta AISI 304-AISI 304	91
4.88	Doblado de raíz para la junta AISI 304-AISI 304	91
4.89	Diagrama Esfuerzo vs. Deformación para la junta AIS 1008-AISI 304	92
4.90	Doblado de cara para la junta AISI 1008-AISI 304	92
4.91	Doblado de raíz para la junta AISI 1008-AISI 304	92
4.92	Diagrama Esfuerzo vs. Deformación para la junta AISI 1008-AISI 430	93
4.93	Doblado de cara para la junta AISI 1008-AISI 430	94
4.94	Doblado de raíz para la junta AISI 1008-AISI 430	94
4.95	Diagrama Esfuerzo vs. Deformación para la junta AISI 430-AISI 304	94
4.96	Doblado de cara para la junta AISI 430-AISI 304	95
4.97	Doblado de raíz para la junta AISI 430-AISI 304	95
5.1	Zona de fusión de la junta AISI 430-AISI 430. Ampliación 100x	96
5.2	Microestructura del metal de soldadura tipo 430	96
5.3	ZAC en la soldadura de un acero AISI 430. Ampliación 25x	97
5.4	Acero inoxidable tipo 430, microestructura de la ZAC	97
5.5	ZAC en la soldadura del acero inoxidable AISI 430. Ampliación 400x	97
5.6	Zona de fusión en la junta AISI 304-AISI 304. Ampliación 100x	98
5.7	Zona de fusión del acero inoxidable austenítico. Tipo de solidificación FA	98
5.8	Zona de fusión del acero inoxidable austenítico. Tipo de solidificación FA	98
5.9	Metal base del acero inoxidable AISI 304. Ampliación 200x	99
5.10	ZAC en el acero inoxidable AISI 304. Ampliación 200x	99
5.11	Ferrita a lo largo de las fronteras de grano de austenita en la ZAC	100
5.12	Ferrita en la ZAC para la soldadura del acero AISI 304. Ampliación 100x	100
5.13	Probables precipitados en la ZAC del acero AISI 304. Ampliación 100x	100
5.14	Zona de fusión en junta AISI 1008-AISI 304. Solidificación tipo AF. Ampliación 100x	101
5.15	Microestructura resultado de una solidificación tipo AF	101
5.16	Frontera de fusión en la junta AISI 1008-AISI 304. Ampliación 100x	102
5.17	Frontera de fusión en la junta AISI 1008-AISI 304. Ampliación 100x	102
5.18	ZAC en el acero AISI 1008 en la junta AISI 1008-AISI 304. Ampliación 100x	102
5.19	ZAC en el acero AISI 304 en la junta AISI 1008-AISI 304. Ampliación 100x	102
5.20	Zona de fusión en la junta AISI 1008-AISI 430. Ampliación 100x	103
5.21	Frontera de fusión en la junta AISI 1008-AISI 430. Ampliación 100x	104
5.22	Frontera de fusión en la junta AISI 1008-AISI 430. Ampliación 50x	104
5.23	ZAC del acero AISI 1008 en la junta AISI 1008-AISI 430. Ampliación 100x	104
5.24	ZAC del acero AISI 430 en la junta AISI 1008-AISI 430. Ampliación 50x	104
5.25	Zona de fusión en la junta AISI 304-AISI 430. Ampliación 100x	105
5.26	Zona de fusión en la junta AISI 304-AISI 430. Ampliación 200x	105

5.27	Frontera de fusión cercana al acero inoxidable 430. Ampliación 50x	106
5.28	Frontera de fusión cercana al acero inoxidable 304. Ampliación 50x	106
5.29	Frontera de fusión cercana al acero inoxidable 304. Ampliación 200x	106
5.30	Espécimen soldado y traccionado AISI 430-AISI 430.Cara	108
5.31	Espécimen soldado y traccionado AISI 430-AISI 430. Raíz	108
5.32	Espécimen soldado y traccionado AISI 304-AISI 304. Cara	109
5.33	Espécimen soldado y traccionado AISI 304-AISI 304. Raíz	109
5.34	Espécimen soldado y traccionado AISI 1008-AISI 304. Cara	111
5.35	Espécimen soldado y traccionado AISI 1008-AISI 304. Raíz	111
5.36	Espécimen soldado y traccionado AISI 1008-AISI 430. Cara	112
5.37	Espécimen soldado y traccionado AISI 1008-AISI 430. Raíz	112
5.38	Espécimen soldado y traccionado AISI 430-AISI 304. Raíz	114
5.39	Espécimen soldado y traccionado AISI 1008-AISI 304. Cara	114

SIMBOLOGÍA

d	=	Diámetro de cresta del tornillo, mm
d_r	=	Diámetro de núcleo del tornillo, mm
d_m	=	Diámetro medio del tornillo, cm
d_e	=	Diámetro del eje guía, cm
E	=	Módulo de elasticidad, $\frac{Kg}{cm^2}$
E_0	=	Diámetro del grano, μm
f	=	Coefficiente de fricción entre roscas
F	=	Peso, Kg
G	=	Tamaño de grano
I	=	Inercia de la sección transversal, cm^4
K	=	Factor ferrítico de Kaltenhauser
k_f	=	Factor de acabado de superficie
k_s	=	Factor de tamaño
k_r	=	Factor de confiabilidad
k_t	=	Factor de temperatura
k_m	=	Factor diverso
k	=	Factor total
K_C	=	Factor de concentración de esfuerzos por fatiga
l	=	Avance, mm
L	=	Luz o longitud de la viga, cm
m_1	=	Motor de corriente continua
m_2	=	Motor PAP
M_t	=	Momento Torsor, Kg-cm
M_1	=	Momento 1 en la guía para la condición de empotramiento, Kg-cm
M_2	=	Momento 2 en la guía para la condición de empotramiento, Kg-cm
Mf_{max}	=	Momento flector máximo, Kg-cm
N	=	Número de hilos
n	=	Coefficiente de seguridad
P	=	Carga aplicada por el indentador piramidal en el equipo de dureza Vickers, Kg

$r =$	Radio del brazo utilizado para determinar el torque del motor CD utilizado
$R_1 =$	Reacción 1 en la guía para la condición de empotramiento, Kg
$R_2 =$	Reacción 2 en la guía para la condición de empotramiento, Kg
$s =$	Área subrayada en el pozo de soldadura, mm^2
$S =$	Área total del pozo de soldadura, mm^2
$S_y =$	Límite de fluencia, $\frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$
$S_y =$	Límite de fluencia, $\frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$
$S_e =$	Límite de fatiga modificado, $\frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$
$S_e' =$	Límite de fatiga en el aparato experimental bajo condiciones ideales, $\frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$
$S_u =$	Resistencia última a la tensión, $\frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$
$T_1 =$	Torque para vencer la inercia, Kg - cm
$T_r =$	Torque para desplazar el conjunto, Kg-cm
$T_d =:$	Torque disponible en el motor, Kg-cm
$T =$	Torque total
$t =$	Tiempo
$v =$	Velocidad
$VHN =$	Dureza Vickers (Vickers Hardness, por sus siglas en inglés)
$w =$	Velocidad angular
$W =$	Peso de total de la carga, Kg
$x =$	Desplazamiento
$y =$	Deflexión en una viga, mm
$\rho =$	Paso de rosca, mm
$\sigma =$	Esfuerzo normal, $\frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$
$\tau =$	Esfuerzo cortante, $\frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$
$\tau_m =$	Esfuerzo cortante medio, $\frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$
$\tau_a =$	Esfuerzo cortante amplitud, $\frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$
$\theta =$	Ángulo

LISTA DE ABREVIATURAS

A	Austenita.
AF	Tipo de solidificación compuesta de Austenita+ Ferrita.
CA	Corriente alterna.
CC	Corriente continua.
CCEN	Corriente continua electrodo negativo.
CCEP	Corriente continua electrodo positivo.
CD	Corriente directa.
CCT	Diagrama de Transformación Isotérmica (Cooling Continue Tranformation).
FA	Tipo de solidificación compuesta de Ferrita+ Austenita.
F	Tipo de solidificación compuesta de Ferrita.
F	Ferrita.
GTAW	Soldadura de Arco de Tungsteno y protegido por Gas (Gas Tungsten Arc Welding).
LPM	Litros por minuto.
L	Líquido.
M	Martensítica.
MB	Metal Base.
MF	Metal Fundido (o Zona de Fusión).
PAP	Motor paso a paso.
TIG	Soldadura de Tungsteno protegido por gas.
WPS	Especificación del Procedimiento de Soldadura (Welding Procedure Specification).
ZAC	Zona afectada por el calor.
ZF	Zona de Fusión (Metal fundido o pozo de soldadura).

LISTA DE ANEXOS

- ANEXO 1:** Especificación del procedimiento de soldadura para la junta AISI 430-AISI 430
- ANEXO 2:** Especificación del procedimiento de soldadura para la junta AISI 304-AISI 304
- ANEXO 3:** Especificación del procedimiento de soldadura para la junta AISI 1008-AISI 1008
- ANEXO 4:** Especificación del procedimiento de soldadura para la junta AISI 1008-AISI 430
- ANEXO 5:** Especificación del procedimiento de soldadura para la junta AISI 1008-AISI 304
- ANEXO 6:** Especificación del procedimiento de soldadura para la junta AISI 430-AISI 304
- ANEXO 7:** Líneas de programación del PIC 16F77A
- ANEXO 8:** Líneas de programación del PIC Esclavo 16F628A
- ANEXO 9:** Líneas de programación del PIC Esclavo 16F628A
- ANEXO 10:** Circuito de control electrónico

SUMARIO

La relación microestructura/propiedades para soldaduras similares y disímiles entre aceros inoxidables AISI 430, AISI 304 y acero de bajo contenido de carbono AISI 1008 han sido evaluadas en este trabajo con la finalidad de determinar los cambios microestructurales y las propiedades mecánicas de las juntas como: microdureza Vickers, resistencia a la fluencia y rotura.

Los materiales fueron soldados en una sola pasada usando el material de aporte ER-316L con el proceso GTAW semiautomático, para lo cual se diseñó y construyó un dispositivo de traslación lineal que permitió controlar la longitud de arco y velocidad de avance.

Los resultados microestructurales para las juntas mostraron en la zona afectada por el calor del acero inoxidable AISI 430: crecimiento de grano ferrítico con límites martensíticos y precipitación de carburos intragranulares. El acero inoxidable austenítico AISI 304 mostró ferrita columnar y tipo placas en la zona de fusión. El acero de bajo contenido de carbono AISI 1008 mostró en la zona afectada por el calor un notable incremento en el tamaño de grano.

Los perfiles de microdureza Vickers indicaron una tendencia descendente desde la zona de fusión hasta el metal base. Los ensayos de doblado revelaron buena ductilidad en las juntas, mientras que los límites de fluencia y rotura tuvieron resistencias aceptables.

Esta investigación ha demostrado muy buenos resultados para la relación entre la microestructura y propiedades en este tipo de soldaduras disímiles.

SUMMARY

The microstructure-property relationship for similar and dissimilar welding between stainless steels AISI 430, AISI 304 and steel AISI 1008 of low carbon content has been evaluated in this work to determine the micro-structural changes and the mechanical properties of the joints such as Vickers micro-hardness, yield and tensile strength.

The material were welded in only one pass using the contribution material ER-316L with the semi-automated GTAW process. A lineal translation device was designed and constructed permitting to control the arc length and advance velocity.

The micro-structural results for the joints showed, in the heat affected zone of stainless steel AISI 430, a growth of the ferrous grain with martensitic limits and precipitation of intra-granular carbides. The austenitic AISI 304 stainless steel showed columnar ferrite and plate type in the fusion zone. The low carbon content steel AISI 1008 showed, in the heat affected zone, a significant increase in the grain size. The Vickers micro-hardness profiles indicated a decreasing tendency from the fusion zones up to the base metal. The bending trials revealed a good ductility in the joints while the yield and tensile strength had acceptable resistance.

This investigation has shown very good results for the micro-structure-property relationship in this dissimilar welding type.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

Antecedentes

La soldadura es fundamental para una gran variedad de trabajos relacionados con la ingeniería. Alcanzar una mayor comprensión de los procesos usados para unir materiales similares y disímiles tiene gran importancia técnica y científica. Uno de los procesos de soldadura de amplia aplicación es el de electrodo de tungsteno protegido por gas o GTAW (Gas Tungsten Arc Welding).

La relación microestructura - propiedades en el proceso GTAW entre materiales disímiles es trascendente debido a que muchas veces los materiales a unir no son iguales por ende no tienen las mismas propiedades mecánicas y características metalúrgicas tanto antes como después de realizada la soldadura.

En la facultad existen tesis afines al área de investigación como: Sistema computarizado de procedimientos de calificación de soldadura según normas [1], Selección de electrodos para aceros al carbono, aceros inoxidable, aluminio y hierro fundido [2], Influencia del gas protector en el proceso de soldadura GMAW de aceros estructurales AISI 1008 y AISI 1045 [3]. Adicionalmente existen varios trabajos relacionados con este tema ejecutados por investigadores en varias instituciones y organismos alrededor del mundo [4, 5]. Algunos de estos trabajos tienen alcances similares a los de esta propuesta aunque no enfocan completamente el problema específico que se desea estudiar.

Esta investigación pretende determinar características metalúrgicas, propiedades mecánicas (dureza, ensayos de tracción, doblado) en las soldaduras de aceros de diferente composición para contribuir con un documento útil dentro del área metalúrgica.

Objetivos

1.2.1 General

Determinar la relación microestructura/propiedades en la soldadura GTAW entre aceros inoxidables y acero al carbono.

1.2.2 Específicos

- Determinar las transformaciones microestructurales que ocurren en la soldadura y el metal base durante el proceso GTAW.
- Diseñar un dispositivo de traslación lineal para ejecutar soldaduras semiautomáticas a velocidad constante.
- Realizar experimentos de soldadura en placas de aceros similares y entre aceros de diferente composición química para determinar variaciones de estructura y propiedades de las juntas soldadas.
- Analizar y discutir los resultados.

Justificación

1.3.1 Justificación técnica

Los aceros de bajo contenido de carbono AISI 1008 y los inoxidable como el AISI 304 y AISI 430 son utilizados debido a sus propiedades mecánicas y características relativas de corrosión.

Las soldaduras de diferentes materiales tienen generalmente más cambios que aquellas de materiales similares tanto en propiedades físicas, mecánicas y metalúrgicas. Estas diferencias suelen complicar la selección del material de aporte dificultando la predicción de sus propiedades y su microestructura.

El desconocimiento de propiedades mecánicas como: la resistencia a la tracción, doblado, características metalúrgicas, perfiles de dureza en la zona afectada por el calor utilizando el proceso de soldadura GTAW propicia la necesidad de esta investigación conocimiento de antemano las múltiples aplicaciones de soldadura entre materiales diferentes como por ejemplo: estructuras que deben trabajar en ambientes salinos , industria química, petrolera, de alimentos que frecuentemente usan materiales compuestos por aleaciones de composición distinta para mejorar la distribución de temperatura, resistencia a la corrosión, mejorar la eficiencia térmica, entre otras.

Haciendo un análisis de la importancia de este tipo de uniones es necesario incrementar los conocimientos de estas.

Debido a la necesidad de producir soldaduras sin variación descontrolada de parámetros se construirá un dispositivo de traslación lineal para ejecutar soldaduras semiautomáticas a velocidad constante permitiendo así combinar conocimientos de mecánica y electrónica aplicados a este tipo de necesidad específica.

1.3.2 Justificación económica

El análisis de los posibles cambios en las características y propiedades de los aceros: de bajo contenido de carbono AISI 1008 e inoxidables AISI 304 y AISI 430 luego de realizada la soldadura GTAW permitirá conocer los parámetros del proceso, las transformaciones que ocurren en la zona fundida (ZF) y en la zona afectada por el calor (ZAC). Esta información contribuirá a mejorar significativamente la soldadura de estos materiales y consecuentemente disminuiría pérdidas por uniones deficientes que incumplan características y/o especificaciones necesarias para determinadas aplicaciones.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Acero

Los aceros al carbono y aceros aleados [6], son identificados por las designaciones: AISI (Instituto Americano del Hierro y el Acero), SAE (Sociedad de Ingenieros Automotrices) o ASTM (Sociedad Americana de Pruebas en Materiales). Los sistemas AISI y SAE usan comúnmente cuatro dígitos donde los dos últimos indican el rango promedio de carbono. Los primeros dos dígitos indican el grado de estos:

10xx No resulturizados

11xx Resulturizados

12xx Resulturizados y refosforizados

Las designaciones AISI y SAE de cuatro dígitos son utilizadas para productos como planchas, tiras y barras. La especificación ASTM es utilizada para planchas y perfiles estructurales.

Las propiedades mecánicas de la mayoría de aceros al carbono son producidas por establecimientos preocupados en regular el bienestar y seguridad de las personas. El establecimiento de mayor influencia es la ASTM. Otros grupos grandes también son la SAE y ASME. Las especificaciones ASTM son amplias y cubren los requerimientos de muchas industrias. Además hay otros grupos que realizan especificaciones para los aceros según necesidades e intereses particulares para industrias.

Aceros laminados de bajo contenido de carbono

Son ampliamente usados en una variedad de productos de la industria y son fabricados para formado, soldadura o ambos. El acero utilizado en este trabajo es el AISI 1008 cuya resistencia mínima a la fluencia es 180 MPa.

La composición de este tipo de aceros varia dentro de un rango específico donde pequeñas diferencias en el contenido de elementos diferentes al hierro pueden afectar las características de rolado y formado. Algunas composiciones contienen menos del 30% de elementos diferentes del hierro sin embargo alrededor de 80% de láminas y planchas roladas tienen una composición basada en los siguientes rangos:

Tabla 2.1: Porcentaje de elementos en aceros de bajo contenido de carbono. [6]

Elementos	%
-----------	---

Carbono	0.03 -0.12
Manganeso	0.20 - 0.60
Silicio	0.02 - 0.15
Fosforo	0.04 máx.
Azufre	0.04 máx.

2.2 Aceros inoxidables

Los aceros inoxidables [7] [8] , se aplican a muchas aleaciones preparadas a base de hierro las cuales contienen por lo menos 12% de cromo con o sin adiciones de otros elementos de aleación. La propiedad notable de los aceros inoxidables es su resistencia a la corrosión en muchos aunque no en todos los medios corrosivos. Además poseen una adaptabilidad excepcional a los procesos de conformado en frío, en caliente y pueden desarrollar una alta resistencia a la tensión y al movimiento plástico. La composición de los aceros inoxidables es normalizada y cada aleación posee un número específico de tipo AISI.

Los aceros inoxidables de los tipos 301, 302, 303 y 304 se emplean con frecuencia para ornamentos arquitectónicos, equipos para restaurantes, fuentes de sodas, herrajes para cocina, tornillos, remaches, partes de máquinas, partes forjadas, etc.

2.2.1 Influencia de los distintos elementos de aleación en los aceros inoxidables

Influencia del cromo y carbono

En la Figura 2.1 se observa que la ferrita de todas las aleaciones hierro – cromo cuyo contenido de cromo oscila entre 0 y 12 % se transforma por calentamiento en austenita o fase gamma (γ). Por enfriamiento rápido hasta la temperatura ambiente se consigue transformar la austenita en martensita (aceros martensíticos). Además como el límite del bucle gamma corresponde a 13 % del cromo aproximadamente todas las aleaciones hierro – cromo con contenidos de cromo superiores a 13 % serán aleaciones ferríticas al no existir transformación de la fase alfa (α) en la fase gamma (γ).

Las aleaciones hierro – cromo con contenidos de cromo entre 12 y 13 por ciento forman a elevadas temperaturas estructuras bifásicas ($\alpha + \gamma$) que enfriadas rápidamente a temperatura ambiente presentarán una estructura formada por ferrita y perlita (aceros martensíticos - ferríticos).

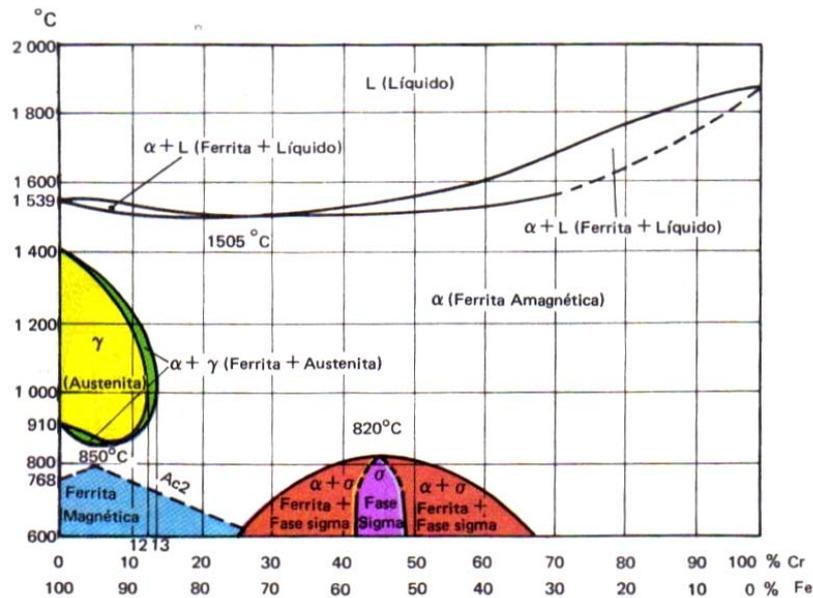


Figura 2.1: Diagrama Hierro-Cromo. [7]

En las aleaciones hierro – cromo con contenidos de este último de 25 a 42 % y de 48 a 65 % a temperaturas comprendidas entre 600 y 900 °C, aparece una fase intermetálica llamada fase sigma (σ) que coexisten con la ferrita. Con contenidos de cromo de 42 a 48 % aproximadamente toda la ferrita puede transformarse en fase sigma (σ). Esta fase es muy dura, frágil y se puede disolver en la ferrita calentando por encima de los 900 °C.

Al aumentar el contenido de carbono se amplía el límite del bucle gamma (γ) siendo un elemento favorecedor de la formación de esta fase.

Influencia del níquel

El níquel amplía el campo de estabilidad de la austenita y rebaja la temperatura a la que ocurre la transformación α - γ . La Figura 2.2 muestra el diagrama Fe-Cr-Ni, en la que se indica la formación a temperatura ambiente de las distintas estructuras según el contenido de hierro, cromo y níquel.

Fase sigma

Una de las razones para la formación de la fase sigma en los aceros inoxidable se debe a la presencia de ferrita cuando se mantiene durante largo tiempo a temperaturas comprendidas entre los 600 y 900 °C transformándose en un compuesto intermetálico de hierro y cromo.

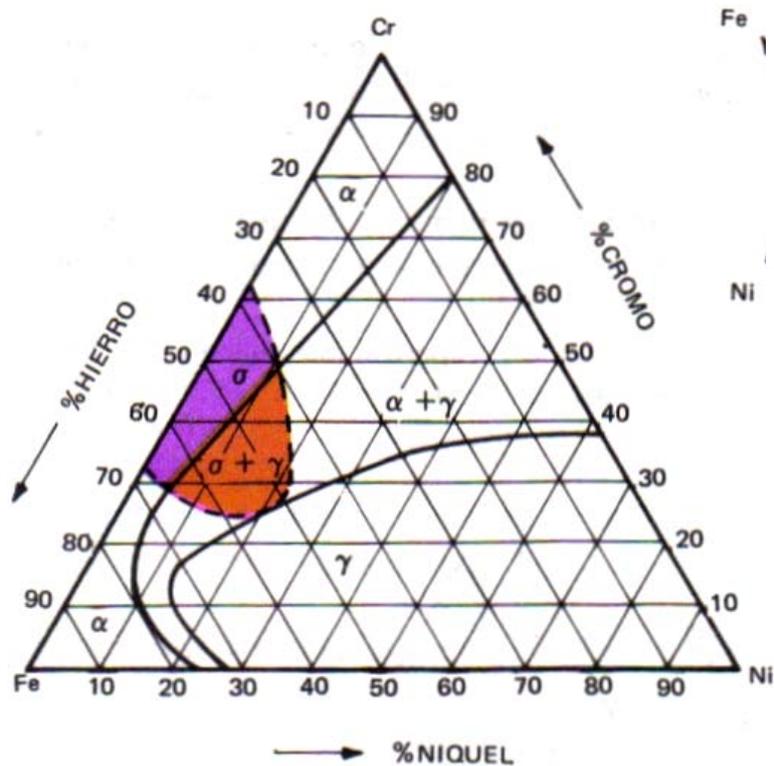


Figura 2.2: Diagrama Fe-Cr-Ni a temperatura ambiente [7]

Esta fase se caracteriza fundamentalmente por su pérdida de ductilidad, resiliencia y sus características fundamentales son:

- Dureza superior
- Provoca grietas muy finas.

La fase sigma no solamente se forma en los aceros con alto contenido de cromo ya que puede darse en los aceros ferríticos con contenidos de cromo desde 14%. También existe la posibilidad que se forme en los aceros austeníticos y austeno-ferríticos.

Los elementos silicio, molibdeno, niobio y titanio al favorecer la formación de la fase delta favorecen la formación de la fase sigma. La precipitación de la fase sigma también aumenta cuando el acero ha sido sometido previamente a una transformación en frío.

Su influencia es notable en las características mecánicas, resistencia a la corrosión y las propiedades de la soldadura. A temperaturas bajo cero la resiliencia de los aceros inoxidables austeníticos se reduce sensiblemente.

2.2.2 Composición de los aceros inoxidables

Además del cromo, elemento base de los aceros inoxidable, pueden intervenir en su composición otros como: níquel, molibdeno, volframio, manganeso, aluminio, titanio, niobio, vanadio, cobalto, nitrógeno, etc. y según en las cantidades que se encuentren adquieren distintas estructuras después de la soldadura.

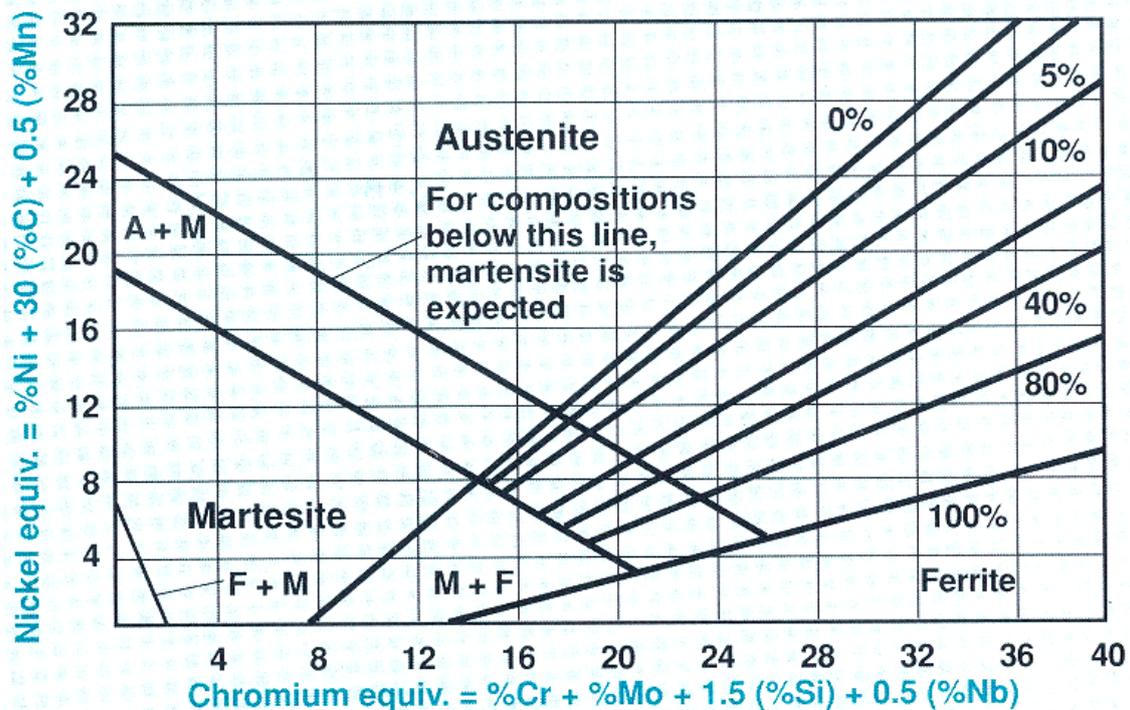


Figura 2.3: Diagrama de Schaeffler [8]

Una forma de valorar el efecto de los distintos elementos en metalurgia de la soldadura consiste en referir al cromo todos los elementos alfégenos y al níquel todos los elementos gammágenos. Este criterio es usado en el diagrama de Schaeffler que es muy utilizado debido a que permite predecir la microestructura del metal soldado basado en la composición química de los metales base.

2.2.3 Aceros inoxidables ferríticos

A esta la familia pertenecen los aceros con cromo de 15 a 18 % y 0.12 % máximo de carbono. Tienen una resistencia a la corrosión superior a los aceros martensíticos. También pertenecen a esta familia los aceros de 25 a 30 % de cromo con carbono inferior a 0.35 %. En estos aceros cuando el contenido de cromo aumenta la resiliencia disminuye, esto se observa en la Figura 2.4.

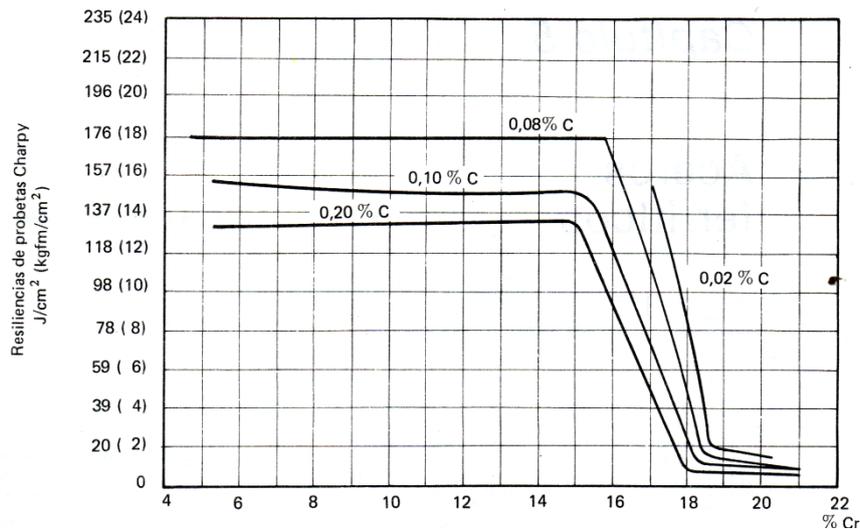


Figura 2.4: Variación de la resiliencia en función del contenido de carbono y de cromo. [7]

Acero inoxidable ferrítico AISI 430

Resiste bien a la oxidación hasta temperaturas de 850°C y es más resistente a la corrosión con un pulido brillante. En general este acero presenta una resistencia a la corrosión intermedia entre los aceros martensíticos y austeníticos.

Es propenso a engrosar el grano a temperaturas elevadas y adquiere fragilidad con permanencias prolongadas entre 450 y 500 °C (fragilidad a 475 °C) en consecuencia aumenta la carga de rotura y desciende sensiblemente la resiliencia.

Después de la soldadura es aconsejable realizar un “Recocido de distensión” ya que puede quedar reducida la resistencia a la corrosión en las zonas afectadas por las temperaturas superiores a 900°C y que se han enfriado en aire. Además en estas zonas aumenta el tamaño de grano disminuyendo su tenacidad. Mejoramos su ductilidad con contenidos de carbono inferiores a 0.06 %

- **Composición química (%)**

Tabla 2.2: Composición química del acero inoxidable ferrítico AISI 430. [8]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0.12	1.00	1.00	0.040	0.030	16.0	0.75
máx.	máx.	máx.	máx.	máx.	18.0	máx.

- **Propiedades mecánicas**

Características mecánicas a temperatura ambiente.

Tabla 2.3: Propiedades Mecánicas del acero inoxidable AISI 430. [8]

Tipo	Resistencia min. a la tensión (MPa)	Resistencia min. a la fluencia (MPa)	Elongación min. 50 mm (%)
430	450	205	22

- **Metalurgia de la soldadura**

Predicción de la microestructura

El diagrama de Schaeffler cubre los rangos de composición para aceros inoxidables ferríticos, pero se ha probado [8] que es relativamente inexacto para predecir si la martensita estará presente en las aleaciones ferríticas. El factor ferrítico de Kaltenhauser es útil y puede ser usado para predecir si la microestructura es completamente ferrítica, sin embargo este no suministra información de la cantidad de martensita que estará presente. El factor K se muestra abajo y no puede ser aplicado por igual para todas las aleaciones.

$$K - factor = \%Cr + 6\%Si + 8\%Ti + 4\%Mo + 2\%Al - 40\%(C + N) - 2\%Mn - 4\%Ni$$

Para las aleaciones de medio contenido de cromo como el tipo 430, Kaltenhauser determino que este factor debe exceder 17.0 para prevenir la formación de martensita en la soldadura. En la práctica muchos de los aceros inoxidables comerciales están formulados de manera que el factor K no se excede, por lo tanto la soldadura en estas aleaciones no son completamente ferríticas y contienen ciertas cantidades de martensita.

El diagrama que ayuda a determinar la probable cantidad de martensita presente en algunos aceros inoxidables es el diagrama de Balmforth, Figura 2.5. El diagrama de Balmforth fue desarrollado para predecir la microestructura de las soldaduras en aceros inoxidables ferríticos y martensíticos solamente a partir de su composición. Este diagrama no considera la influencia del material de aporte en estos aceros. Actualmente es el más preciso para predecir la microestructura de la soldadura en los aceros inoxidables ferríticos y martensíticos.

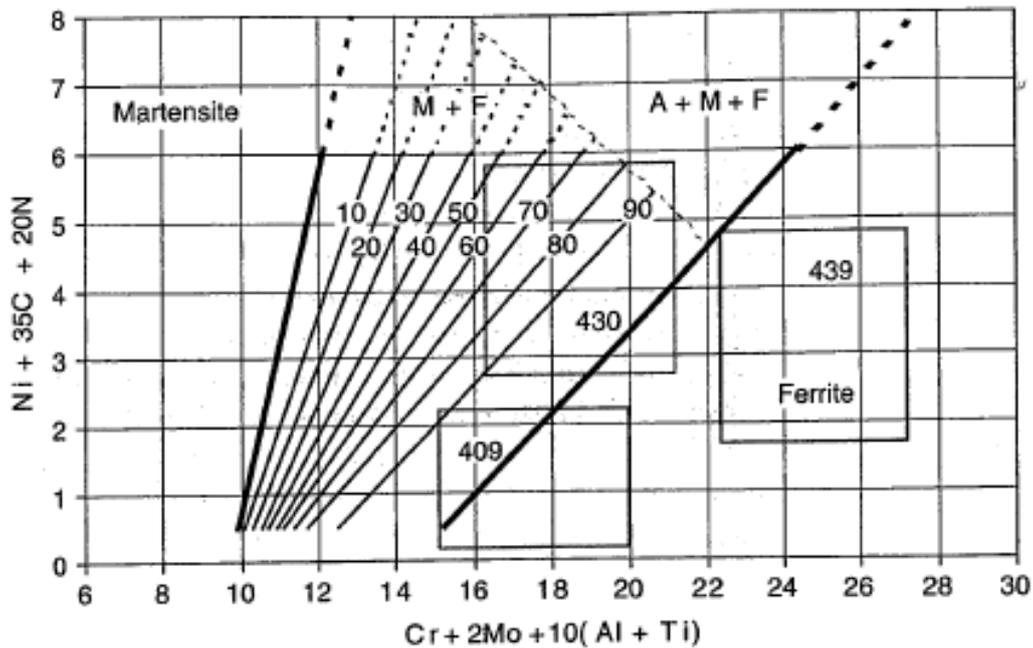


Figura 2.5: Diagrama de Balmforth con rangos de composición 409, 430 y 439. [8]

Evolución de la microestructura en la Zona de Fusión

La microestructura de la zona de fusión (ZF) puede ser completamente ferrítica o una mezcla de ferrita y martensita localizada en los bordes de grano de ferrita.

Tres secuencias de solidificación y transformación son posibles para los aceros inoxidables ferríticos. La secuencia que toma el acero inoxidable 430 en la zona de fusión es la siguiente:



La solidificación ocurre desde ferrita, esta ferrita es estable en el estado sólido sobre algunos rangos de temperatura. Con el enfriamiento alguna austenita se forma a elevada temperatura en los bordes de grano de ferrita. Luego esta austenita se transforma en martensita en la zona de fusión por el enfriamiento hasta la temperatura ambiente. Esta secuencia es descrita en la Figura 2.6 cuando se considera un contenido de carbón de 0.05 a 0.15 % típico del acero inoxidable 430.

En la Figura 2.7 se muestra la microestructura de un acero inoxidable ferrítico AISI 430 luego de soldado. Los granos ferríticos están rodeados de martensita en los bordes.

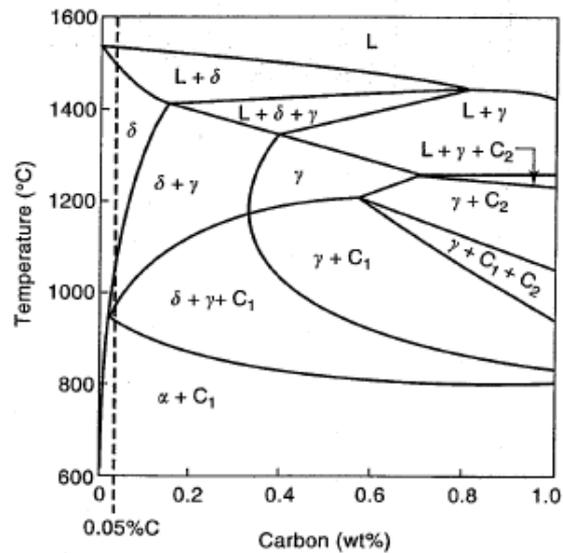


Figura 2.6: Diagrama de fase 17%Cr. Composición aproximada de un acero AISI 430 [8]

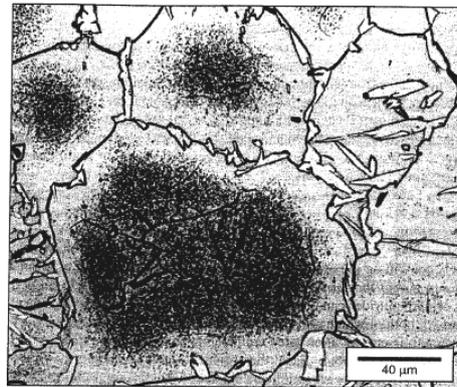


Figura 2.7: Zona de Fusión en un acero inoxidable ferrítico AISI 430 [8]

Características de precipitación

La soldadura de aceros inoxidables ferríticos frecuentemente muestra una fina dispersión de precipitados dentro de ferrita o en los límites ferrita-martensita. Estos precipitados se forman debido a la saturación de carbono y nitrógeno a elevadas temperaturas en la fase ferrítica.

En aleaciones inestables como la tipo 430, estos precipitados son primordialmente carburos ricos en cromo $(Cr, Fe)_{23}C_6$ y $(Cr, Fe)_{23}(C, N)_6$ o nitruros ricos en cromo. Durante el enfriamiento los carburos pueden formarse intergranularmente o intragranularmente todo depende de la tasa de enfriamiento. Tasas altas de enfriamiento forman carburos intragranularmente mientras que tasas lentas prefieren los sitios en los límites de grano.

En aceros inoxidables ferríticos de bajo y medio cromo que contienen hasta 0.05% de carbono la precipitación en la zona de fusión de carburos es inevitable en la ausencia de

elementos estabilizadores (Ni y Ti). Muchas de las modernas composiciones de aceros inoxidables contienen de 0.02 a 0.03% de carbono para evitar la formación de muchos carburos pero aun así en estos aceros se espera precipitación. Estas precipitaciones pueden conducir a una reducción local de cromo en los límites haciéndolo potencialmente sensitivos a la corrosión.

Zona afectada por el calor

En la ZAC pueden ocurrir algunas reacciones metalúrgicas. Durante el ciclo de calentamiento cualquier carburo u otras precipitaciones tienden a disolver. Dependiendo de la composición de la aleación, la ZAC puede ser completamente ferrítica o una mezcla de ferrita y austenita.

Como el carbono tiene relativamente baja solubilidad en ferrita a bajas temperaturas estos pueden ser una fuerte razón para forzar la precipitación. La austenita que se forma a elevadas temperaturas se transformará en martensita durante el enfriamiento. Esta martensita normalmente será distribuida en los límites de grano de ferrita. Esto es a menudo confundido con austenita pero hay que recordar que la martensita simple refleja la morfología de la austenita que se formó a elevada temperatura.

La Figura 2.8 muestra la microestructura de un acero inoxidable tipo 430 donde se observa la zona de fusión y la ZAC.

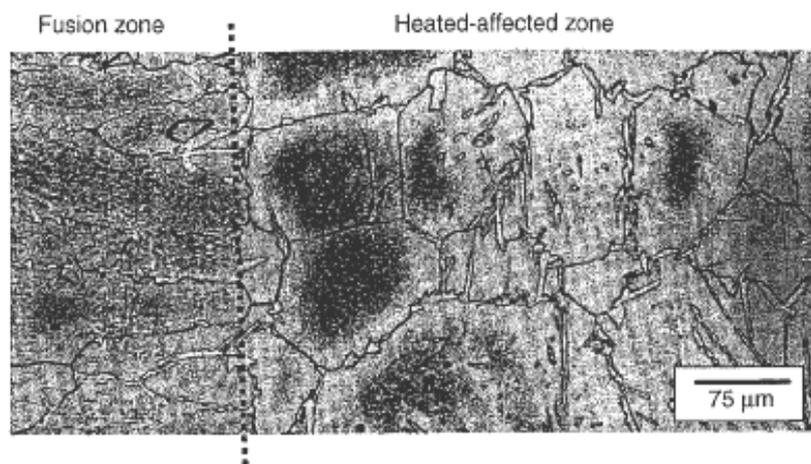


Figura 2.8: Zona de fusión y ZAC en un acero AISI 430 [8]

2.2.4 Aceros inoxidables austeníticos

Al igual que los aceros inoxidables ferríticos no presenta transformación alguna en el calentamiento porque su estructura es austenítica a cualquier temperatura.

Engrosan el grano a temperaturas elevadas o con permanencias largas pero la fragilidad que adquieren no es tan peligrosa como en los aceros ferríticos. Por ser difícil determinar el límite de proporcionalidad se suele adoptar el que corresponde a un alargamiento permanente de 0.2 %.

Una de las buenas propiedades de los aceros inoxidable austeníticos es la ausencia de fragilidad a bajas temperaturas, todo lo contrario de lo que sucede en los martensíticos y ferríticos. Mantienen resilancias excelentes a temperaturas cercanas al cero absoluto por el contrario el resto de las características mecánicas varían notablemente (aumentan la carga de rotura, el límite elástico y disminuyen el alargamiento).

Con tratamiento térmico no es posible variar las características mecánicas de esta familia de aceros ya que en el calentamiento no existe transformación estructural.

Con transformación en frío conseguimos mejorar la carga de rotura y el límite elástico pero se vuelven ligeramente magnéticos al transformarse parte de la austenita en martensita.

La acritud producida por una deformación en frío no sólo endurece el acero sino que aumenta su permeabilidad magnética y el límite de fatiga.

Acero inoxidable austenítico AISI 304

Cuando se le mantiene a temperaturas comprendidas entre 450 y 900 °C se provoca la precipitación de carburos que lo hacen sensible a la corrosión intergranular. Estos carburos precipitados podemos disolverlos con un temple austenítico.

Este problema aparece en la soldadura precipitando carburos en las zonas cercanas al cordón donde la temperatura está comprendida entre 450 y 900 °C. Por ello su empleo queda limitado a aquellas piezas que posteriormente pueden recibir un temple austenítico.

Para espesores pequeños puede emplearse la soldadura de arco sin metal de aportación y bajo atmósfera de argón puro. La estructura de este acero es austenítica a todas las temperaturas y es amagnético.

- **Composición química (%)**

Tabla 2.4: Composición química del acero inoxidable austenítico AISI 304. [8]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0.08	1.00	2.00	0.045	0.030	18.00	8.00
máx.	máx.	máx.	máx.	máx.	20.00	10.50

- **Propiedades mecánicas**

Características mecánicas a temperatura ambiente.

Tabla 2.5: Propiedades mecánicas del acero inoxidable austenítico AISI 304. [8]

Tipo	Resistencia min. a la tensión (MPa)	Resistencia min. a la fluencia (MPa)	Elongación min. 50 mm (%)
304	515	205	40

- **Metalurgia de la soldadura**

Evolución de la microestructura en la Zona de Fusión

Hay 4 posibles solidificaciones y transformaciones hasta el estado sólido para la soldadura de los aceros inoxidables austeníticos. Estas reacciones se muestran en la Tabla 2.6 y tienen relación con el diagrama de fase Fe-Cr-Ni en la Figura 2.9. Las solidificaciones tipo A (Austenita) y AF (Austenita – Ferrita) están asociados con la austenita primaria. Las solidificaciones tipo FA (Ferrita – Austenita) y F (Ferrita) tienen ferrita delta como fase primaria.

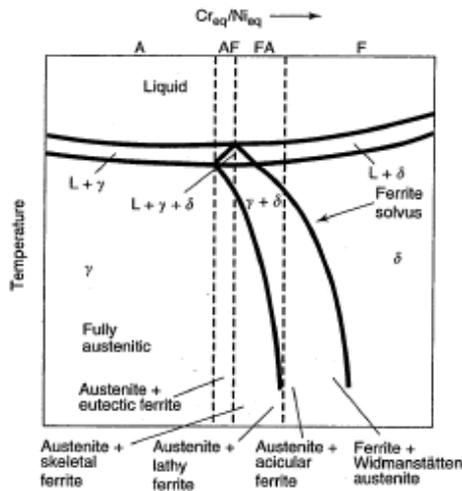


Figura 2.9: Tipos de solidificación para el diagrama de fase pseudobinario [8]

Tabla 2.6: Tipos de solidificación, reacciones y microestructuras resultantes. [8]

Tipo de Solidificación	Reacción	Microestructura
A	$L \rightarrow L+A \rightarrow A$	Completamente Austenítico, buena definición de la estructura solidificada
AF	$L \rightarrow L+A \rightarrow L+A+(A+F)_{eut} \rightarrow A+F_{eut}$	Ferrita en las fronteras de de las dendritas
FA	$L \rightarrow L+F \rightarrow L+F+(F+A)_{per/eut} \rightarrow F+A$	Ferrita columnar como resultado de la transformación ferrita-a-austenita
F	$L \rightarrow L+F \rightarrow F \rightarrow F+A$	Ferrita acicular o Granos de matriz

		ferrítica con fronteras de grano de austenita y placas de Widmanstätten
--	--	---

El acero inoxidable austenítico AISI 304 generalmente sufre solidificaciones tipo AF y FA. Este tipo de solidificaciones y su evolución se describen a continuación:

Solidificación Tipo AF

Esta solidificación ocurre debido a elementos que promueven la ferrita (primordialmente Cr y Mo) particionando los límites de grano durante la solidificación para promover la formación de ferrita como un producto final de la solidificación.

La solidificación tipo AF (Austenita- Ferrita) se da al final del proceso de solidificación de la austenita primaria vía reacción eutéctica. La ferrita que se forma se halla en los límites de la austenita, es relativamente estable y resiste la transformación en austenita durante el enfriamiento de la soldadura desde que ha sido enriquecida por los elementos promotores de ferrita.

Un esquema de esta solidificación se muestra en la Figura 2.10 así como un ejemplo de la microestructura en los límites de los subgranos.

Solidificación Tipo FA

Cuando la solidificación va desde ferrita primaria hay dos posibilidades. Si al final existen formas austeníticas en la solidificación se denomina Tipo FA. Esta austenita se forma por una reacción peritética-eutéctica y está en los límites de la ferrita solidificada.

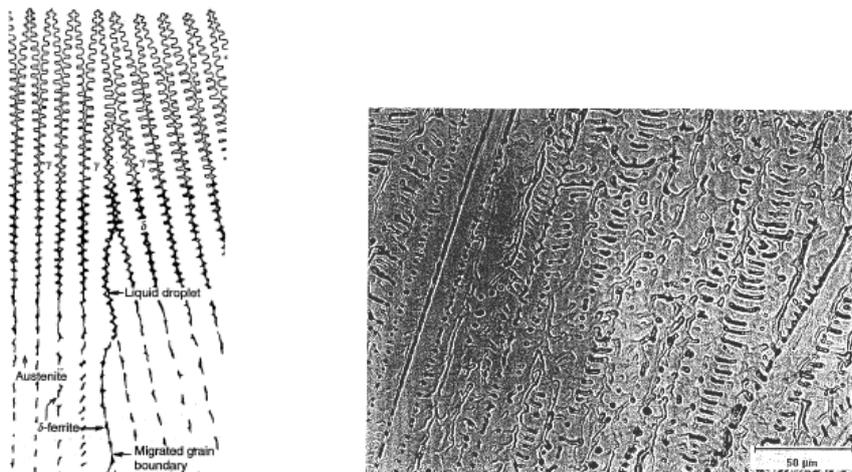


Figura 2.10: Microestructura en la ZF resultado de una solidificación tipo AF. [8]

La secuencia de solidificación y transformación que provocan morfologías ferríticas es la siguiente:

1. Al final de la solidificación de ferrita, una reacción peritectica–eutéctica da como resultado la formación de austenita sobre la celda de ferrita y límites dendríticos. Esta reacción ocurre dentro de la región trifásica mostrada en la Figuras 2.9. Se llama eutéctica-peritectica por ser una composición dependiente y resultado de una transición desde una reacción peritectica en el sistema Fe-Ni a una reacción eutéctica en el sistema Fe-Cr-Ni.
2. Cuando la solidificación esta completa la microestructura consiste en dendritas de ferrita primaria con marcas de austenita interdendrítica. El incremento de la austenita presente depende de las condiciones de solidificación y los valores de la relación Cr equiv / Ni equiv.
3. Como el metal soldado enfría desde ferrita + austenita, la ferrita se incrementa de manera inestable y la austenita consume la ferrita por difusión controlada.
4. Cuando las tasas de enfriamiento son moderadas y/o la relación Cr equiv / Ni equiv es baja pero aún se encuentran dentro de los rangos FA resulta en una morfología columnar. Esta es una consecuencia del avance de la austenita consumiendo la ferrita hasta que la ferrita es suficientemente enriquecida por elementos promotores (Cr y Mo) y agota en elementos promotores de austenita (Ni, C y N) que es estable a bajas temperaturas donde la difusión es limitada. Un esquema de la microestructura columnar y su micrografía se observa en la Figura 2.11.
5. Cuando las tasas de enfriamiento son altas y la relación Cr equiv / Ni equiv incrementa dentro del rango FA en la Figura 2.9 resulta en una morfología ferrítica tipo placas. Esta morfología se forma en lugar de la morfología columnar debido a la restricción en la difusión durante la transformación ferrita-austenita. Cuando las distancias de difusión son reducidas es más eficiente que la transformación proceda en placas espaciadas más estrechamente que resulta en una ferrita residual que atraviesa la dendrita en la dirección de crecimiento Figura 2.12.

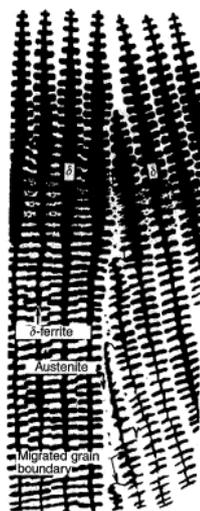


Figura 2.11: Solidificación FA: Esquema de la ferrita columnar y su microestructura en la ZF.
[8]

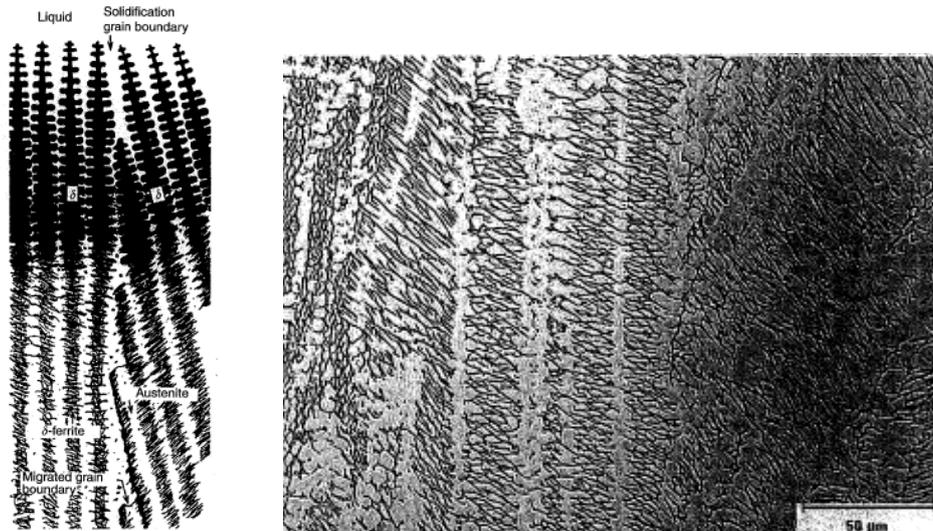


Figura 2.12: Solidificación FA: Esquema de la ferrita tipo placa y microestructura en la ZF [8]

Zona afectada por el calor

En los aceros inoxidable austeníticos la ZAC depende de la composición y microestructura del metal base. Las siguientes reacciones metalúrgicas pueden ocurrir en la ZAC de las aleaciones austeníticas.

a) Crecimiento de grano

En la mayoría de aceros inoxidable austeníticos soldados el crecimiento de grano es restringido a menos que la energía de soldadura sea extremadamente alta. En metales base que han sido endurecidos por deformación en frío puede existir una recristalización y el crecimiento de grano. En ese caso se distingue en la ZAC tamaños de grano más grandes que el metal base.

b) Formación de ferrita

En la Figura 2.9 las aleaciones cuya composición están a la derecha del rango completamente austenítico formaran ferrita cuando se caliente a temperaturas bajo la línea de solidus.

Una relación alta Cr equiv/Ni equiv formará más fácilmente ferrita. Cuando la ferrita se forma lo hace usualmente a lo largo de las fronteras del grano como se observa en la Figura

2.13. En la ZAC la formación de ferrita a lo largo de la frontera del grano restringirá el crecimiento y minimizará la susceptibilidad a las fisuras.

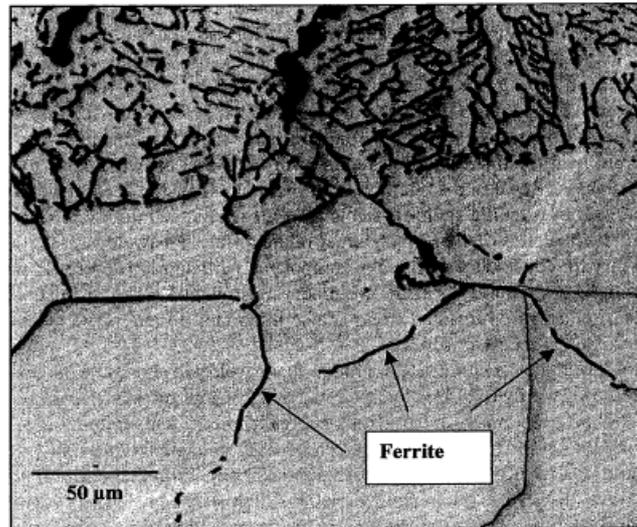


Figura 2.13: Ferrita formada en las fronteras de grano austenítico en la ZAC [8]

c) Precipitación

Cuando la ZAC es calentada a temperaturas que aprovechan la línea de solidus de la aleación muchos de los precipitados que están presentes en el metal base pueden disolverse. Esto puede conducir a la supersaturación de la matriz de austenita durante el enfriamiento resultando en la formación de varios precipitados. Los precipitados más comunes que se forman en la ZAC de los aceros inoxidable austeníticos son carburos y nitruros. Estos se forman generalmente a lo largo de los bordes de grano o en la interfase ferrita -austenita.

Las Figuras 2.14 y 2.15 muestran los rangos de temperaturas en las cuales son estables los carburos $(Cr, Fe)_2 C_6$ y nitruros $Cr_2 N$. Aunque metalográficamente pueden muchas veces no ser apreciables es seguro que estos precipitados estarán presentes en la ZAC de la mayoría de aleaciones austeníticas.

Su tamaño, distribución y morfología dependen de la composición de la aleación y del ciclo térmico en la ZAC. Muchos precipitados de carburos ricos en cromo pueden llevar a degradar la resistencia a la corrosión.

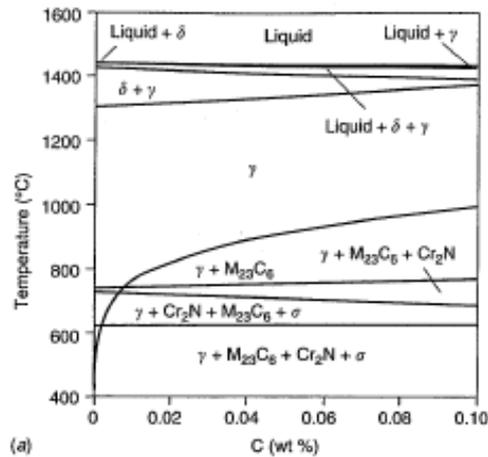


Figura 2.14: Diagramas de fase: Fe-18Cr-10Ni-1.5Mn-0.5Si-0.04N, C variable. [8]

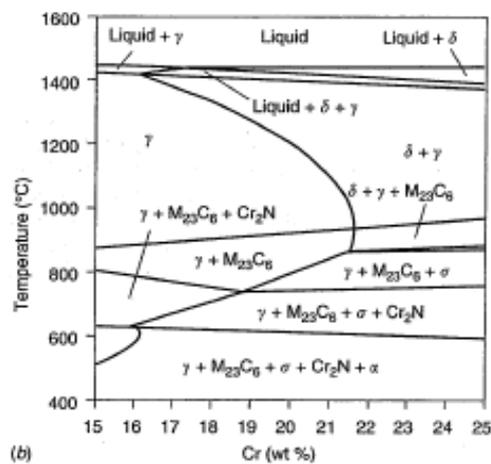


Figura 2.15: Diagramas de fase: Fe-10Ni-1.5Mn-0.5Si-0.04N, Cr variable. [8]

2.3 Soldadura por arco de tungsteno y gas

La soldadura por arco de tungsteno y gas (Gas Tungsten Arc Welding, GTAW) es un proceso de soldadura que utiliza un arco entre un electrodo de tungsteno (no consumible) y el charco de soldadura. El proceso se emplea con un gas protector sin aplicación de presión. La adición de metal de aporte es opcional. [9]

El proceso GTAW se ha vuelto una herramienta indispensable en muchas industrias en virtud de la alta calidad de las soldaduras producidas y del bajo costo del equipo. Algunos de los componentes del proceso GTAW son: el equipo, los consumibles empleados, los procedimientos, variables del proceso, sus aplicaciones y consideraciones de seguridad.

2.3.1 Principios de funcionamiento

- **Descripción del proceso**

El proceso de soldadura por arco de tungsteno y gas se ilustra en la Figura 2.16. El proceso utiliza un electrodo de tungsteno o una aleación de tungsteno no consumible sostenido en un soplete. Se alimenta gas protector por el soplete para proteger el electrodo, el charco de soldadura y el metal de soldadura en proceso de solidificación. El arco eléctrico se produce por el paso de corriente a través del gas protector ionizado que conduce la electricidad. El arco se establece entre la punta del electrodo y el trabajo. El calor generado por el arco funde el metal base. Una vez establecido el arco y el charco de soldadura el soplete se mueve a lo largo de la unión y el arco funde progresivamente las superficies de empalme. Si se usa alambre de aporte se alimenta por el borde delantero del charco de soldadura para llenar la unión.

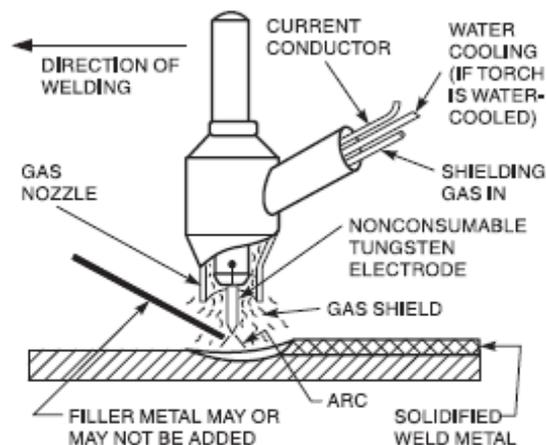


Figura 2.16: Representación del proceso soldadura GTAW [9]

Ventajas del proceso

Estas son algunas de las ventajas del proceso de arco de tungsteno y gas:

1. Produce soldaduras de muy buena calidad generalmente libre de defectos.
2. Está libre de las salpicaduras que ocurren con otros procesos de soldadura por arco.
3. Puede usarse con metal de aporte o sin él, según lo requiera la aplicación específica.
4. Ofrece un control excelente de la penetración de la pasada de raíz.
5. Puede producir soldaduras autógenas económicas a altas velocidades.
6. Puede usar fuentes de potencia de costo relativamente bajo.
7. Permite controlar de manera precisa las variables de soldadura.
8. Puede servir para soldar casi todos los metales incluso las uniones de metales disímiles.
9. Permite controlar en forma independiente la fuente de calor y las adiciones de metal de aporte.

Limitaciones del proceso

Algunas de las limitaciones del proceso de arco de tungsteno y gas son:

1. Las tasas de deposición son más bajas que las que pueden alcanzarse con procesos de soldadura por arco con electrodo consumible.
2. El soldador requiere un poco más de destreza y coordinación que con los procesos por arco de metal y gas o la de arco de metal revestido.
3. Para secciones de más de 10 mm de espesor resulta menos económica que los procesos de soldadura por arco con electrodo consumible.
4. Es difícil proteger debidamente la zona de soldadura en lugares donde hay corrientes de aire.

- **Variables del proceso**

Las principales variables en el proceso GTAW son el voltaje de arco (longitud del arco), la corriente de soldadura, la velocidad de recorrido y el gas protector. La cantidad de energía producida por el arco es proporcional a la corriente y al voltaje e inversamente proporcional a la velocidad de recorrido.

Corriente del arco

En términos generales la corriente del arco controla la penetración de la soldadura; su efecto es directamente proporcional. Además la corriente del arco afecta el voltaje; si se mantiene constante la longitud del arco, su voltaje aumentará en proporción con la corriente. Por esta razón si se desea mantener una longitud de arco fija es preciso ajustar también el voltaje cuando se ajusta la corriente.

El proceso puede usarse con corriente tanto continua como alterna y la elección depende en buena parte del metal que se va a soldar. La corriente continua con el electrodo negativo ofrece las ventajas de penetración profunda y velocidades de soldadura altas sobre todo cuando se usa escudo de helio. El helio es el gas preferido de la soldadura mecanizada. La corriente alterna tiene una acción catódica (chisporroteo) que elimina óxidos refractarios de las superficies de unión de aluminio y magnesio lo que permite obtener soldaduras de muy buena calidad. En este caso es preciso usar argón como gas protector porque no puede lograrse chisporroteo con helio. El argón es el gas preferido para la soldadura manual sea que se utilice con corriente alterna o continua.

Voltaje del arco

El voltaje medido entre el electrodo de tungsteno y el trabajo se conoce comúnmente como el voltaje de arco. Este voltaje es una variable muy dependiente de:

1. La corriente del arco.
2. La forma de la punta del electrodo de tungsteno.
3. La distancia entre el electrodo de tungsteno y el trabajo.
4. El tipo de gas protector.

El voltaje de arco cambia cuando cambian las otras variables y sólo se utiliza para describir los procedimientos de soldadura porque es fácil de medir. Las demás variables como el gas protector, el electrodo y la corriente se determinan previamente. El voltaje del arco puede servir para controlar la longitud del arco una variable crítica que es difícil de vigilar. La longitud del arco es importante en este proceso porque afecta la anchura del charco de soldadura; la anchura del arco es proporcional a la longitud del arco. Por tanto, en casi todas las aplicaciones con excepción de aquellas en las que se suelda lámina la longitud del arco recomendada es la más corta posible.

Velocidad de recorrido

La velocidad de recorrido afecta tanto la anchura como la penetración de la soldadura aunque el efecto sobre la anchura es más pronunciado que aquel sobre la penetración. La velocidad de recorrido es importante por su efecto sobre el costo. En algunas aplicaciones la velocidad de recorrido se define como un objetivo y las demás variables se seleccionan de modo que se logre la configuración de soldadura deseada a esa velocidad. En otros casos la velocidad podría ser una variable dependiente elegida de modo que se obtenga una soldadura con la calidad y uniformidad deseada en las mejores condiciones posibles con la combinación de las demás variables. Independientemente de los objetivos, en la soldadura mecanizada casi siempre se fija la velocidad de recorrido y se modifican otras variables como la corriente o el voltaje para mantener el control de la soldadura.

2.3.2. Equipo

El equipo para GTAW incluye sopletes, electrodos y fuentes de potencia. Los sistemas de GTAW mecanizada pueden incluir controles de voltaje de arco, osciladores de arco y alimentadores de alambre.

- **Sopletes para soldar**

Los sopletes de GTAW sostienen el electrodo de tungsteno que transporta la corriente de soldadura y conducen el gas protector a la zona del arco. Las especificaciones de los sopletes se refieren a la corriente de soldadura máxima que pueden transportar sin sobrecalentarse. En la Tabla 2.7 se dan los intervalos de corriente típicos.

Tabla 2.7: Comparación de corrientes entre torchas enfriadas con gas y agua. [9]

Características del soplete	Pequeño	Mediano	Grande
Corriente máxima	200	200-300	500
Método de enfriamiento	Gas	Agua	Agua
Diámetros del electrodo (mm)	0.5-2.3	1.0-3.97	1.0-6.0
Diámetros de copa de gas (mm)	6.0-15.0	6.0-18	9.0-18.0

Casi todos los sopletes para aplicaciones manuales tienen un ángulo de 120° entre el electrodo y el mango. Los sopletes para GTAW mecanizada o automática por lo regular se montan en un dispositivo que centra el soplete, lo desplaza sobre la unión y pueden modificar o mantener la distancia entre el soplete y el trabajo.

- **Electrodos**

En GTAW la palabra tungsteno se refiere al elemento tungsteno puro y a las diferentes aleaciones de tungsteno empleadas como electrodos. Los electrodos de tungsteno son no consumibles si el proceso se emplea como es debido ya que no se derriten ni se transfieren en la soldadura. La función del electrodo de tungsteno es servir como una de las terminales eléctricas del arco que proporciona el calor necesario para soldar. El punto de fusión del tungsteno es 3410°C y cuando se acerca a esta temperatura se vuelve termoiónico; es decir es una fuente abundante de electrones. El electrodo alcanza esta temperatura gracias al calentamiento por resistencia y por el considerable efecto de enfriamiento de los electrones que se desprenden de su punta. De hecho la punta del electrodo tiene una temperatura mucho menor que la parte que está entre la punta y el mandril con enfriamiento externo.

Clasificación de los electrodos

Los electrodos de tungsteno se clasifican con base en su composición química como se especifica en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8: Rangos típicos de corriente para electrodos de tungsteno [9]

Diámetro del electrodo	Diámetro int. Copa de gas	Corriente Continua, A		Corriente Alterna, A	
		CCEN	CCEP	Onda no balanceada	Onda balanceada
mm	mm				
0.25	6	hasta 15		hasta 15	
0.50	6	5 a 20		5 a 15	10 a 20
1.00	9	15 a 80		10 a 60	20 a 30
1.6	9	70 a 150	10 a 20	50 a 100	30 a 80
2.4	12	150 a 250	15 a 30	100 a 160	60 a 130
3.2	12	250 a 400	25 a 40	150 a 210	100 a 180

4.0	12	400 a 500	40 a 55	200 a 275	160 a 240
4.8	15	500 a 750	55 a 80	250 a 350	190 a 300
6.4	18	750 a 1100	80 a 150	325 a 450	325 a 450

- **Fuentes de potencia**

Las fuentes de potencia recomendadas para GTAW son las de corriente constante. La potencia requerida para soldar tanto con CA como con CC puede obtenerse de fuentes de transformador rectificador o de generadores rotatorios de CA o CC. Es importante seleccionar la fuente de potencia para GTAW con base en el tipo de corriente requerida para una aplicación en particular. Los tipos de corriente de soldadura incluyen CA sinusoidal, CA de onda cuadrada, CC y CC a pulsos.

Corriente directa

Si se usa corriente directa el electrodo de tungsteno puede conectarse ya sea a la terminal negativa o positiva de la fuente de potencia. En casi todos los casos se escoge que el electrodo sea negativo (cátodo). Con esta polaridad los electrones fluyen del electrodo al trabajo y los iones positivos se transfieren del trabajo al electrodo como se ilustra para CCEN o polaridad directa en la Figura 2.17.

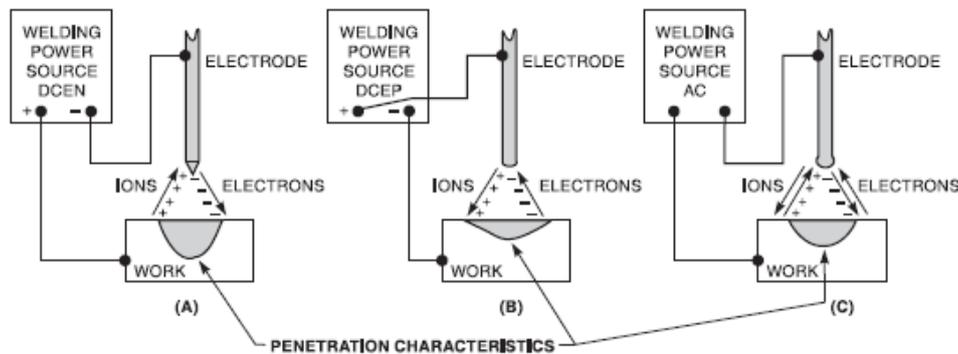


Figura 2.17: Características del tipo de corriente usada para soldadura TIG. [9]

Cuando el electrodo es positivo (ánodo) las direcciones de flujo de electrones y los iones positivos se invierten como se muestra para CCEP o polaridad inversa.

Con CCEN y un electrodo termoiónico como el de tungsteno aproximadamente el 70% del calor se genera en el ánodo y el 30% en el cátodo. Puesto que CCEN produce la mayor parte de calor en la pieza de trabajo para una corriente de soldadura dada, esta polaridad produce mayor penetración en la soldadura que CCEP. La configuración más común empleada en GTAW es CCEN y se usa con argón, helio o una mezcla de los dos para soldar la mayor parte de los metales. Cuando el electrodo de tungsteno se conecta a la terminal positiva

(CCEP) se crea una acción de limpieza catódica en la superficie de la pieza de trabajo. Esta acción ocurre con todos los metales pero es más importante cuando se suelda aluminio o magnesio porque elimina la película de óxido refractario que inhibe la humectación del soldamento por parte de la soldadura.

A diferencia de CCEN donde la punta del electrodo se enfría por la evaporación de los electrones, cuando el electrodo se usa como polo positivo su punta se calienta por el bombardeo de electrones además de la resistencia que opone a su paso por el electrodo. Por lo tanto cuando se usa polaridad inversa se requiere un electrodo de diámetro más grande para una corriente de soldadura dada a fin de reducir el calentamiento por resistencia e incrementar la conducción térmica hacia el mandril del electrodo. La capacidad de transporte de corriente de un electrodo conectado a la terminal positiva es aproximadamente la décima parte de la de un electrodo conectado a la terminal negativa. En general el uso de CCEP está limitado a la soldadura de piezas de lámina.

Soldadura de corriente directa a pulsos

En la CC a pulsos la corriente del arco varía en forma repetitiva desde un valor de fondo hasta un valor pico. Las fuentes de potencia de CC a pulsos por lo regular permiten ajustar la duración del pulso de corriente, el tiempo de la corriente de fondo, el nivel de la corriente pico y el nivel de la corriente de fondo, a fin de producir una salida con forma de onda adaptada a una aplicación particular. La corriente a pulsos por lo regular se aplica con el electrodo negativo. En la soldadura con CC a pulsos el nivel de corriente de pulso suele ajustarse entre 2 y 20 veces el nivel de la corriente de fondo. Esto combina las características de arco vigoroso de la corriente elevada con el aporte de calor bajo de la corriente reducida. La corriente de los pulsos logra buena fusión y penetración, en tanto que la corriente de fondo mantiene el arco y permite que se enfríe el área de soldadura.

Corriente alterna

La corriente alterna experimenta la inversión periódica de la polaridad de electrodo positivo a electrodo negativo. Por tanto la corriente alterna puede combinar la acción limpiadora del trabajo de la polaridad inversa (electrodo positivo) con la penetración profunda característica de la polaridad directa (electrodo negativo). La soldadura con CA se compara con CCEN y CCEP en la Figura 2.17. Las fuentes de potencia de CA para soldadura convencionales producen una salida de voltaje de circuito abierto senoidal que está desfasada cerca de 90° con la corriente. La frecuencia de inversión de voltaje suele estar fijo a la frecuencia estándar de 60 Hz de la potencia primaria. El voltaje de arco real está en fase con la corriente de soldadura. El voltaje que se mide es la suma de las caídas de voltaje en el electrodo, el plasma, el ánodo y el cátodo; todas estas son resultado del flujo de la corriente.

Cuando la corriente cae a cero se presentan diferentes efectos dependiendo de la polaridad. Si el electrodo de tungsteno termoiónico se vuelve negativo proporciona de inmediato electrones para volver a encender el arco. En cambio cuando el charco de soldadura se vuelve negativo no podrá suministrar electrones a menos que el voltaje se eleve lo suficiente para iniciar una emisión de cátodo frío. Sin este voltaje el arco se vuelve inestable.

2.3.3 Tipos de gases protectores

El argón y helio o las mezclas de estos dos son los tipos más comunes de gases inertes empleados como escudo. En aplicaciones especiales se usan mezclas de argón e hidrógeno.

Argón

El argón (Ar) es un gas monoatómico inerte con peso molecular de 40. Se obtiene de la atmosfera por separación de aire licuado. El argón de grado soldadura se refina hasta una pureza mínima del 99.95 %. Esto es aceptable para soldar con GTAW la mayor parte de los metales excepto los reactivos y refractarios para los cuales se requiere una pureza mínima del 99.997 %. En muchos casos estos metales se procesan en cámaras de las que se ha purgado todo el aire antes de iniciarse la operación de soldadura. El argón se utiliza más ampliamente que el helio porque tiene las siguientes ventajas:

1. Acción de arco más uniforme y silencioso.
2. Menor penetración.
3. Acción de limpieza al soldar materiales como el aluminio y el magnesio.
4. Menor costo y mayor disponibilidad.
5. Buena protección con tasas de flujo más bajas.
6. Mayor resistencia a ráfagas transversales.
7. Más fácil iniciación del arco.

La menor penetración de un arco escudado con argón resulta especialmente útil al soldar a mano materiales delgados ya que se reduce la tendencia a una perforación excesiva. Esta misma característica representa una ventaja en la soldadura vertical porque se reduce la tendencia del metal base a pandearse o escurrir.

2.3.4 Tasas de flujo recomendadas

Los requisitos de flujo de gas protector se basan en el tamaño de la copa o la boquilla, el tamaño del charco de soldadura y el movimiento del aire. En general la tasa de flujo aumenta en proporción con el área de sección transversal de la boquilla (considerando la obstrucción

que representa el mandril). Se escoge un diámetro de boquilla apropiado para el tamaño del charco de soldadura y la reactividad del metal que se va a soldar. La tasa de flujo mínima está determinada por la necesidad de un chorro rígido que venza los efectos de calentamiento del arco y las corrientes de aire transversales. Con los sopletes de uso más común las tasas de flujo de gas protector típicas son de 7 a 16 LPM para el argón. Una tasa de flujo de gas excesiva causará turbulencia en el chorro de gas que puede introducir contaminación atmosférica en el charco de soldadura.

Una corriente de aire transversal con velocidad de 8 o más kilómetros por hora puede romper el escudo de gas protector. Los chorros de gas más rígidos sin turbulencia se obtienen incorporando lentes de gas a la boquilla y empleando helio como gas protector. Sin embargo para reducir los costos es preferible usar pantallas protectoras para bloquear el flujo del aire en lugar de aumentar el flujo del gas protector.

CAPÍTULO III

3. DISPOSITIVO DE TRASLACIÓN LINEAL

3.1 Configuración del prototipo

La referencia [13] indica las dimensiones de las placas que se tienen que soldar y de las que se obtendrán las probetas para los ensayos de tracción y doblado. Estos datos permitieron dimensionar el prototipo.

Es importante que el dispositivo sea:

Sencillo: de manera que permita el desenvolvimiento necesario para la investigación; Adecuado: principalmente a nuestra necesidad; Desmontable: permitiendo acceder a elementos que requieran cierta limpieza o recambio.

El dispositivo que se requiere necesita dos movimientos en ejes perpendiculares; uno que se desliza a lo largo de la junta de soldadura y otro que permita controlar la longitud del arco, ambos desplazando el porta electrodo en el mismo plano. Se ha pensado utilizar tornillos que provoquen los desplazamientos. Con este dato y conociendo que se soldarán dos placas con las dimensiones dadas en la referencia [13] se puede proponer un esquema del dispositivo como se muestra en la Figura 3.1.

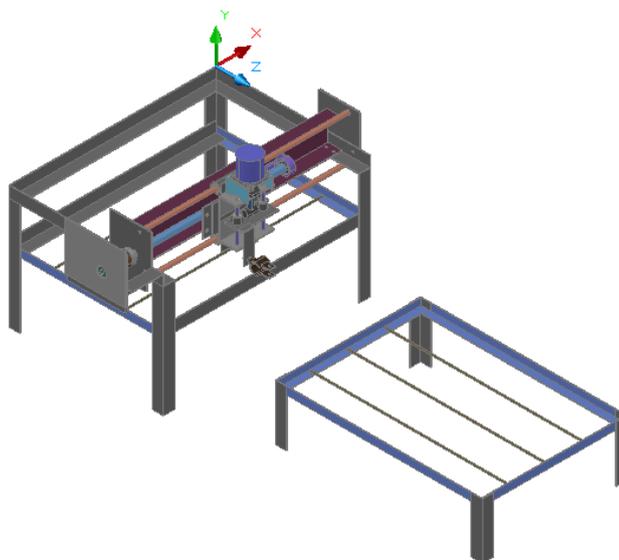


Figura 3.1: Configuración del dispositivo

3.2 Diseño de elementos del dispositivo

Es importante proponer ciertas características para algunos elementos de este dispositivo como el tornillo y las guías. Estas características ayudarán a que el dispositivo tenga un mejor desarrollo en su funcionamiento y serán indicadas a su debida intervención. También se ha decidido diseñar solamente los elementos más representativos e importantes como son el tornillo y las guías principales.

El diseño o la verificación del resto de elementos (ángulos, placas, pernos, etc.) no se ha considerado principalmente debido al tipo de cargas que son relativamente menores y además frente al bajo requerimiento al que estará expuesto todo el dispositivo.

Hay que indicar que el procedimiento de diseño no se ha efectuado en un solo intento, este consistió en analizar una serie de parámetros hasta llegar a obtener la mejor alternativa que permitió desarrollar este trabajo.

3.2.1 Tornillo

Para el tornillo el dato inicial es la velocidad de desplazamiento que necesita el portaelectrodo, en este caso la referencia [10] indica que para el espesor de la placa a soldar la velocidad máxima debería ser:

$$v = 17 \frac{\text{cm}}{\text{mín}}$$

En base a la velocidad fijada se prosigue con la elección de una rosca adecuada.

Existen tres tipos de roscas, la rosca estándar American National (Unificada) que se usa comúnmente en Estados Unidos y Gran Bretaña para todos los productos roscados estandarizados. El ángulo de rosca es de 60° y las crestas de los hilos pueden ser planas o redondeadas.

En la Figura 3.2 se muestran las roscas de perfil cuadrado y Acme que se utilizan en tornillos para transmisión de fuerza o potencia. Puesto que cada aplicación es especial no hay una norma o estándar que relacione el diámetro con el número de hilos por pulgada. La inclinación es escoger una rosca cuadrada principalmente por dos razones:

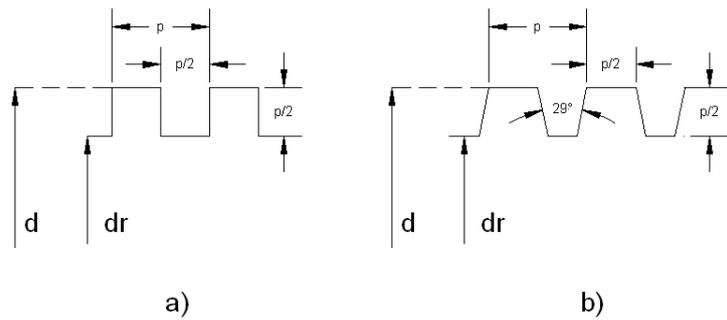


Figura 3.2: Tipos de rosca. [11]

1. Buena eficiencia.
2. Forma sencilla y bajo costo de maquinado.

La primera característica importante considerada para este elemento previo al diseño fue asignarle un paso de 6 mm al tornillo, la razón para este valor se debe a la necesidad de obtener un buen avance del porta electrodo sin que se requiera un giro completo del motor que se utilice, esto da la ventaja de obtener la velocidad deseada utilizando un voltaje menor que el nominal.

Con lo anterior y debido a la configuración de un tornillo de rosca cuadrada, los parámetros constructivos del tornillo son:

$$p = 6\text{mm}$$

$$N = 1$$

$$l = 6\text{mm}$$

$$d = 19.05\text{mm}$$

$$d_r = 13.05\text{mm}$$

Selección del motor

Para el diseño del tornillo se necesita considerar el motor que se utilizará. La tendencia es utilizar un motor paso a paso o uno de corriente continua. Como parte de esta selección se cree necesario determinar dos tipos de torques:



Figura 3.3: Esquema del tornillo

- a) El torque necesario para vencer las inercias por el tornillo y el acople entre el eje del motor - tornillo. T_1
- b) El torque debido a una fuerza necesaria para desplazar el conjunto que se encuentra montado sobre el tornillo que involucra el rozamiento entre tuerca - tornillo y buje - guía. T_f

Esto da la opción de requerir un motor de bajas revoluciones como: un paso a paso (pap) o uno de corriente continua (cc) que proporcionaría un torque tal vez suficiente y una buena estética en el dispositivo debido a su pequeño tamaño.

Torque requerido

Se consideró dos tipos de torques requeridos: el necesario para vencer la inercia de los elementos que rotan y el aquel útil para desplazar el conjunto sobre el tornillo.

- **Torque para vencer la inercia, T_1**

Para obtener los valores de la inercia de los elementos se utilizó el programa AutoCAD® el cual dio los siguientes valores para cada uno de ellos.

Acople

Tabla 3.1: Volumen y radio de giro para el acople.

Volumen, mm ³	Radio de giro Eje z, mm
40825.58	12.57

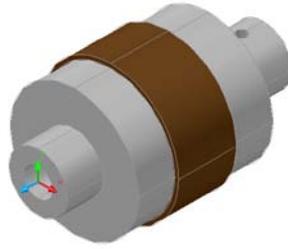


Figura 3.4: Acople

El valor de la inercia anterior con respecto al eje z está calculado para un valor de densidad unitario donde la masa es igual al volumen. Por tanto para la densidad del este elemento, cuyo material es acero: $7.85 \cdot 10^{-3} \text{ Kg/cm}^3$, la masa será la siguiente:

$$m = \rho \cdot V \quad (1)$$

$$m = 0,00785 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^3} \cdot 40825,72 \text{mm}^3 \cdot \frac{1 \text{cm}^3}{(10 \text{mm})^3}$$

$$m = 0,32 \text{ kg} = 320,48 \text{ gr}$$

$$I = m \cdot r^2 \quad (2)$$

$$I = 0,32 \text{ Kg} \cdot (0,13 \text{ cm})^2$$

$$I = 0,0054 \text{ Kg} \cdot \text{cm}^2$$

Tornillo A



Figura 3.5: Tornillo

Tabla 3.2: Volumen y radio de giro para el tornillo.

Volumen, mm ³	Radio de giro Eje z , mm
-----------------------------	--------------------------------

111450.31	6.66
-----------	------

De igual manera que para el acople, se debe obtener la masa real del tornillo para una densidad de $7,85 \text{ E } -03 \text{ Kg/cm}^3$, la masa se indica en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Masa e Inercia del tornillo.

Masa m, (Kg)	Inercia Iz (Kg cm ²)
0.8748	0.3941

La inercia total es:

$$I_T = 0,3941 \text{ Kg.cm}^2$$

Velocidad angular

Para el avance de 6 mm por cada revolución y la velocidad lineal deseada de:

$$v = 17 \frac{\text{cm}}{\text{min}}$$

La velocidad angular se obtiene a continuación:

$$v = \frac{x}{t} \quad (3)$$

$$l = \frac{p}{\theta} \quad (4)$$

Además $x = l.\theta$
(5)

Entonces $v = l.w$

Por lo tanto el valor de la velocidad angular necesaria para alcanzar la velocidad lineal deseada será de:

$$w = 28 \text{ rpm}$$

Aceleración angular

La aceleración angular es un dato necesario para obtener el torque T_1 . Este valor depende del tiempo en el cual se llega desde una velocidad angular inicial ($w_0 = 0 \text{ rev/s}$) hasta la velocidad angular final ($w = 0,47 \frac{\text{rev}}{\text{s}}$); la ecuación es la siguiente:

$$\alpha = \frac{\omega - \omega_0}{t} \quad (6)$$

Se ha considerado algunos valores de tiempo para los cuales se muestran sus aceleraciones en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Aceleración angular y torque requerido, para diferentes tiempos.

Tiempo	Aceleración angular	Torque	
		N-m	Kg-cm
s	rev /s ^2		
0,005	94,00	2,33E-02	2,38E-01
0,010	47,00	1,16E-02	1,19E-01
0,015	31,33	7,76E-03	7,92E-02
0,020	23,50	5,82E-03	5,94E-02
0,025	18,80	4,66E-03	4,75E-02

Para estimar el torque capaz de vencer la inercia de los elementos que rotan, se ha tomado en cuenta la aceleración angular correspondiente al tiempo más bajo mostrado en la Tabla 3.4.

$$T_1 = 0,12 \text{ Kg cm}$$

- **Torque para desplazar el conjunto, T_r**

La ecuación para determinar este torque según la referencia [11] es:

$$T_r = \frac{F d_m}{2} \left(\frac{l + \pi f d_m}{\pi d_m - f l} \right) \quad (7)$$

Donde:

T_r : Par de torsión que se necesita para llevar la carga, Kg-cm

d_m : Diámetro medio, cm

f : Coeficiente de fricción entre roscas

l : Avance

F : Carga, N

Los datos son los siguientes:

Carga (F)

Como se observa en la Figura 3.6, los elementos de colores claros son los que conforman el conjunto.

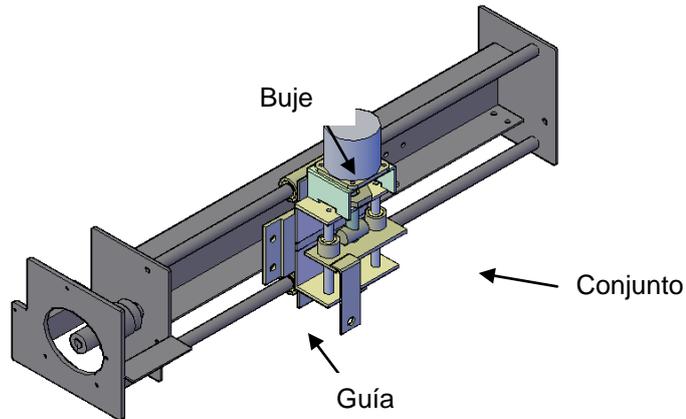


Figura 3.6: Visualización del conjunto

Como se poseía un esquema del dispositivo y de todos los elementos que están involucrados se hizo uso de la herramienta Mass properties de AutoCAD® para obtener la carga.

Al peso total de la Tabla 3.5 es necesario adicionarle el peso del portaelectrodo (aproximadamente 1.5 Kg incluido parte del peso del cable de corriente) y la fricción entre guía – buje, resultando una carga total de 6.2 Kg.

Tabla 3.5: Peso de los elementos que conforman el conjunto sobre el tornillo principal.

Material	Elemento	Número de elem. en el dispositivo	Densidad	Volumen	Peso
			Kg/cm ³	cm ³	Kg
Acero	Tornillo B	1	7,85E-03	15,074	0,118
	Guía	2	7,85E-03	6,342	0,100
	Angulo	2	7,85E-03	61,967	0,973
	Placa	1	7,85E-03	83,085	0,652
	Buje exterior	2	7,85E-03	2,865	0,045
	Tuerca	2	7,85E-03	4,818	0,076
	Rodamiento 1	1	7,85E-03	5,740	0,045

	Rodamiento 2	1	7,85E-03	3,079	0,024
Múltiple	Motor PAP	1	-	146,488	0,680
Bronce	Buje interior	2	8,83E-03	2,199	0,039
				Peso Total	2,752

Diámetro medio (d_m)

$$d_m = d - \frac{p}{2} \quad (8)$$

$$d_m = 19,05\text{mm} - \frac{6\text{mm}}{2}$$

$$d_m = 16,05\text{mm}$$

Coefficiente de fricción entre roscas (f). Dato disponible para la fricción entre acero y bronce [11].

$$f = 0,08$$

Avance (l). Definido como

$$l = p \times N \quad (9)$$

Donde

N : es el número de hilos existentes en el tornillo

p : Paso, mm

$$p = 6\text{mm}$$

$$N = 1$$

$$l = 6\text{mm}$$

Reemplazando todos los valores anteriores el par de torsión necesario es:

$$T_r = \frac{6,2 \times 1,60}{2} \left(\frac{0,6 + \pi \times 0,08 \times 1,60}{\pi \times 1,60 - 0,08 \times 0,6} \right)$$

$$T_r = \frac{6,2 \times 1,605}{2} \left(\frac{1,00}{5,04 - 0,05} \right)$$

$$T_r = \frac{6,2 \times 1,60}{2} \left(\frac{1,00}{4,97} \right)$$

$$T_r = 1.0 \text{ Kg cm}$$

El valor total del torque tanto de inercia como de carga que debe ser capaz de proveer el motor es de:

$$T = T_1 + T_r \quad (10)$$

$$T = 1,12 \text{ Kg cm}$$

Anteriormente se indicó que se trataría de seleccionar un motor PAP o uno DC, se cree que la mejor opción es utilizar un motor de corriente continua debido al buen torque que disponen y también por sus dimensiones pequeñas.

Se evito ubicar un motor PAP debido a que el mercado posee motores pequeños con torques muy bajos aun incluso utilizando la técnica de doblar el paso para que incremente su torque.

Se ha utilizado un motor de imán permanente que necesita de 4.5 a 4.8 voltios de alimentación para obtener la velocidad angular (rpm) necesaria. Para determinar su torque real fue necesario someterlo a una prueba.

La prueba fue la siguiente: En el eje del motor se montó un brazo de longitud r (25 mm), al final del brazo se ubicó un dinamómetro el cual tomó los datos de fuerza aplicado para que el eje detenga su rotación. Se realizó este experimento para algunos voltajes.

Tabla 3.6: Torques para diferentes voltajes en el motor de CD.

Voltaje	Torque
Volts	Kg.cm
4.8	6
5.8	6.4
6.4	6.5
7.5	8.3

En la Tabla 3.6 se observa que para una alimentación de 4.8 voltios el motor provee el torque necesario para desplazar al conjunto.

$$T_d = 6 \text{ Kg.cm}$$

$$6 \text{ Kg.cm} > 1,12 \text{ Kg cm}$$

a) Análisis estático

El tornillo va a estar sometido a la acción del esfuerzo torsor dado por el torque máximo que el motor CC da al mecanismo.

Esfuerzo por torsión

Ahora que se conoce el torque disponible del motor, se puede realizar el diseño de este elemento en aquellos sectores donde el eje se apoya en los rodamientos puesto que estas serian las más expuestas al esfuerzo torsor por ser las que en la configuración inicial tiene el menor diámetro. Luego se verificará para el resto del tornillo con las dimensiones antes asumidas.

$$\tau = \frac{16 T}{\pi d_m^3} \quad (11)$$

$$\tau = \frac{16 \times (6)}{\pi d_m^3} = \frac{30.56}{d_m^3} \left[\frac{Kg}{cm^2} \right]$$

Teoría de diseño

Para el diseño se piensa utilizar la Teoría del esfuerzo cortante máximo (Tresca).

$$\sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} = \frac{S_y}{n} \quad (12)$$

Debido a que el esfuerzo torsor es el de mayor influencia la expresión se reduce a:

$$2\tau = \frac{S_y}{n}$$

$$2 \cdot \left(\frac{30.56}{d_m^3} \right) = \frac{S_y}{n}$$

La referencia [5] indica que para un acero de transmisión AISI 1020 con un límite de fluencia $S_y = 2142 \frac{Kg}{cm^2}$ y para un coeficiente de seguridad estático de 3, el diámetro sería de:

$$2 \cdot \left(\frac{30.56}{d_m^3} \right) = \frac{2142}{3}$$

$$d_m^3 = \frac{61.12}{714}$$

$$d_m = 0,44 \text{ cm} \rightarrow \tau = 358.7$$

La Tabla 3.4 muestra los esfuerzos existentes para los diferentes diámetros del tornillo; debido a que las dimensiones que posee son mayores que la requerida se asegura su resistencia.

Tabla 3.7: Esfuerzo torsor en las diferentes dimensiones del tornillo.

Diámetro mm	Esfuerzo Torsor Kg/ cm ²
10	30.56
13	13.90
19	4.45

b) Análisis dinámico

Cálculo del límite de fatiga

La referencia [11] se ha utilizado para determinar los valores de las siguientes ecuaciones

$$S_e = k_f k_g k_r k_t k_m \cdot S_e' \quad (13)$$

Donde:

S_e : Límite de fatiga modificado

S_e' : Límite de fatiga en el aparato experimental bajo condiciones ideales para torsión

$$S_e' = 0,29 S_u \quad (14)$$

S_u : Resistencia a la rotura

Para un valor

$$k = k_f k_g k_r k_t k_m$$

(15)

Con los siguientes valores $k = 0,92 \times 0,89 \times 0,90 \times 1 \times 1 = 0,74$

El factor de concentración de esfuerzos por fatiga es:

$$K_C = 1,4$$

En el extremo del tornillo se ha realizado un agujero pasante de 3 mm de diámetro, así un valor de sensibilidad a la muesca para ese dato y con la resistencia última del material es:

$$q_n = 0,7$$

$$K_f = 1 + (K_c - 1)q_n \quad (16)$$

$$K_f = 1 + (1,4 - 1)0,7$$

$$K_f = 1,28$$

Entonces el límite de fatiga tiene el siguiente valor:

$$S_e = 0,74 \times 0,29 \times S_u$$

De la referencia [5] el valor S_u para un acero de transmisión AISI 1020 es $3877 \frac{Kg}{cm^2}$

$$\frac{S_e}{K_f} = 650 \frac{Kg}{cm^2}$$

Fluctuación de esfuerzos y coeficiente de seguridad

El esfuerzo torsor se invierte totalmente debido al motor. La fluctuación es alternada como se puede observar en la Figura 3.7.

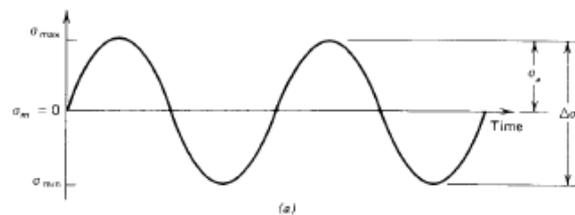


Figura 3.7: Grafica Esfuerzo-Tiempo, fluctuación completamente invertida. [5]

El esfuerzo medio para este tipo de fluctuación es cero $\tau_m = 0$

El esfuerzo de amplitud en la parte crítica (diámetro = 10 mm) tienen un valor de:

$$\tau_a = \frac{30.56}{d^3} = 30.56$$

Por lo tanto:

$$d_{\text{critico}} = 1 \text{ cm} \quad \tau_{\alpha} = 30.56 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$$
$$\tau_{\alpha} = \frac{Q_{\alpha}}{n} \tag{17}$$

$$30.56 = \frac{650}{n}$$

$$n = 21.2$$

3.2.2 Guías

Estos elementos deben soportar el peso del conjunto montado sobre el tornillo. Hay que indicar que estarán sujetos en sus extremos mediante pernos M6. Con el dato anterior el diámetro debería ser mayor a 6 mm para que el perno ingrese en su extremo (taladrado y roscado) dejando un adecuado espesor de pared.

a) Cálculo estático

Peso total

El peso total es 4.3 Kg y corresponde al peso del conjunto más el porta electrodo y cable.

Cálculo de reacciones

Para el cálculo de las reacciones, el peso total del conjunto deslizante debe ser trasladado desde su centro de masa hasta los ejes de las guías; debido al traslado se generará un momento, estas dos cargas se indican en la Figura 3.8. Para ubicar el centro de masa del conjunto y la distancia desde ese punto hasta la guía se utilizó nuevamente la herramienta Mass properties de AutoCAD®.

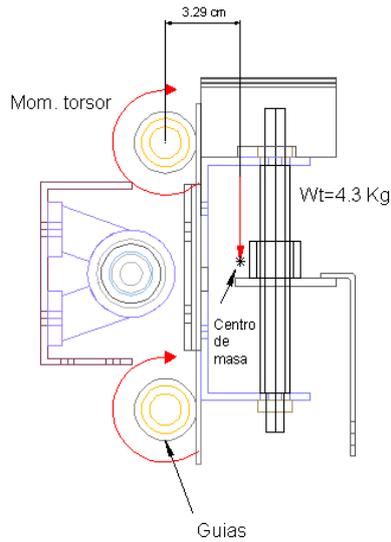


Figura 3.8: Vista lateral del conjunto, ubicación del peso total y el momento provocado.

El valor de la fuerza flectora sobre la guía es:

$$W = 4.3 \text{ Kg}$$

El valor de momento torsor no afecta directamente al diseño de la guía ya que no existe conexión directa con el buje. Este valor será transmitido a los pernos ubicados en los extremos provocando corte. Su valor es:

$$M_t = 14.15 \text{ Kg} - \text{cm}$$

Tomando en cuenta que los extremos de la guía tienen la condición de empotramiento, se realiza los cálculos basados en las ecuaciones de la elástica de la viga de la referencia [11].

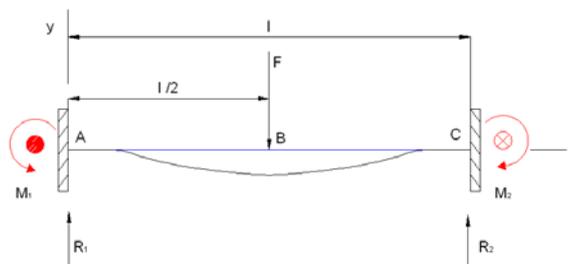


Figura 3.9: Doble empotramiento: Carga Central. [11]

La longitud total del elemento es de 55.4 cm. Los valores para las reacciones y los momentos son los siguientes:

$$R_1 = 1.1 \text{ Kg}$$

$$M_1 = -14.89 \text{ Kg cm}$$

$$R_2 = 1.1 \text{ Kg}$$

$$M_2 = 14.89 \text{ Kg cm}$$

Diagrama de momentos

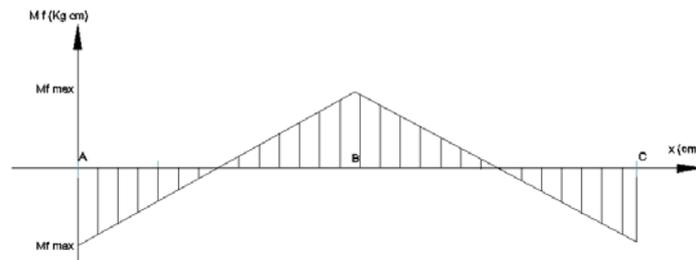


Figura 3.10: Diagrama de momento.

$$M_{f_{max}} = 14.89 \text{ Kgcm}$$

Esfuerzo flector

En la Figura 3.10 se observa el diagrama de momentos, el valor máximo va a desarrollarse tanto en los extremos como en el punto medio, teniendo el siguiente valor:

$$M_{f_{max}} = 14.89 \text{ Kgcm}$$

El esfuerzo debido a este momento es:

$$\sigma_f = \frac{32M_f}{\pi d_e^3} \quad (18)$$

$$\sigma_f = \frac{32 \times 14.89}{\pi d_e^3} = \frac{151.66}{d_e^3}$$

Criterio de Tresca

$$\sqrt{\sigma_x^2 + 4\tau_{xy}^2} = \frac{S_y}{n} \rightarrow \text{TECM}$$

El material de la guía es acero de transmisión AISI 1020 con un $S_y = 2142 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$ y para un coeficiente de seguridad estático de 3, la ecuación queda de la siguiente forma:

$$\sqrt{\left(\frac{151.66}{d_e^3}\right)^2} = \frac{2142}{3}$$

$$\frac{151.66}{d_e^3} = \frac{2142}{3}$$

$$d_e = 0.60 \text{ cm}$$

Tomando un diámetro de 1.27 cm debido a la característica del eje de necesitar taladrados y roscados en sus extremos para la utilización de pernos M6. Se procede a calcular el coeficiente de seguridad con este diámetro.

$$\sqrt{\left(\frac{151.66}{1.27^3}\right)^2} = \frac{2142}{n}$$
$$n = \frac{2142}{74.03}$$

$$n = 28$$

El valor anterior es alto pero existen dos razones que justifican aquel diámetro: la primera es una condición geométrica por la utilización de pernos M6 para sujetar las guías a placas de 3mm en sus extremos. La segunda razón es conseguir una deflexión mínima en la guía y por consiguiente en el conjunto que llevará el portaelectrodo. Cualquier deflexión considerable influirá directamente en la longitud del arco, variando el voltaje, que debe mantenerse constante a lo largo de la soldadura.

El análisis dinámico no es considerado por el alto coeficiente estático consecuencia de los bajos valores de los momentos flectores y también debido a que la utilización del dispositivo no tiene un número de ciclos elevado.

3.2.3 Deflexión en el tornillo y eje

Para el análisis de rigidez se ha utilizado el programa SolidWork®. Los resultados se muestran en las Figuras 3.11 y 3.12.

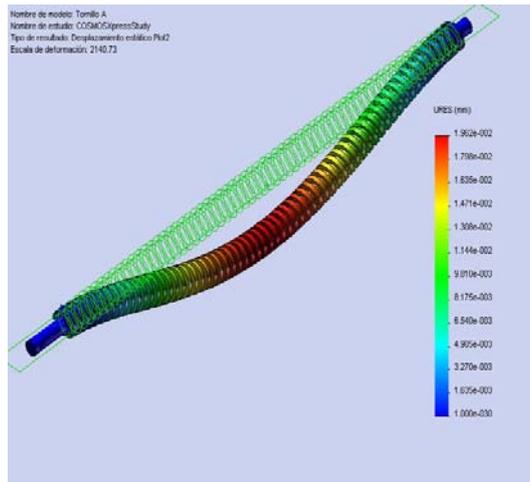


Figura 3.11: Deflexión en el tornillo.

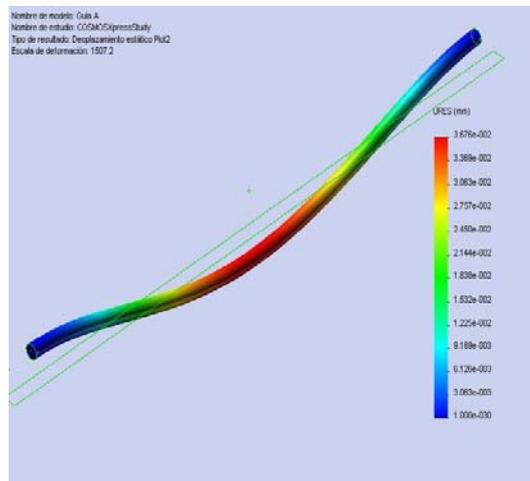


Figura 3.12: Deflexión en el eje.

Las deflexiones obtenidas en el programa son comparadas utilizando la ecuación de la elástica de la viga [15].

$$y_{\text{MAX}} = \frac{FL^3}{192EI} \quad (19)$$

La Tabla 3.8 indica las deflexiones obtenidas con la ecuación de la elástica y con el programa computacional.

Tabla 3.8: Deflexiones en el tornillo y eje.

Deflexiones máximas		
Elemento	Ecuación de la elástica de la viga	SolidWork
Tornillo	0,009 mm	0,019 mm
Eje	0,036 mm	0,037 mm

La flecha mínima y máxima admisible [15], viene dada por:

$$y = \left(\frac{1}{1000} \div \frac{1}{200} \right) L \quad (20)$$

La Tabla 3.9 indica las flechas admisibles. Estos valores no son superados por las deflexiones máximas de los elementos en estudio, siendo adecuados al no afectar la longitud de arco.

Tabla 3.9: Deflexiones máximas y mínimas recomendadas.

Elemento	Flecha admisible	
	Mínima	Máxima
Tornillo	0.38 mm	1.26 mm
eje	0.55 mm	1.84 mm

3.3 Circuito electrónico de control de velocidad

Se ha intentado complementar los conocimientos mecánicos con los electrónicos. Para esta última parte se utilizaron microcontroladores PIC y demás elementos útiles para efectuar esta investigación.

Para conocer que parámetros deben controlar los circuitos es necesario recordar cuál es el procedimiento para soldar manualmente con el proceso TIG. Manualmente el procedimiento más sencillo es el siguiente:

1. Empleando ya sea el método de chispa (alta frecuencia) o de frotamiento se enciende el arco. Y se lo mantiene a una distancia sobre la pieza de trabajo. Entonces el charco de soldadura deberá formarse.
2. Cuando se forme el charco se comienza con el avance.
3. El metal de aporte debe aplicarse en la orilla delantera del charco de soldadura.
4. Se realiza la soldadura deseada.
5. Se rompe el arco para lo cual basta con cortar la corriente de entrada.

Se desea que el control realice lo anterior para lo cual se ha abreviado a los motores que utiliza el dispositivo:

m_1 - Motor de corriente continua: este da movimiento horizontal al conjunto por medio del tornillo más grande, desplazando el portaelectrodo a lo largo de la soldadura.

m_2 - Motor PAP: desplazamiento vertical del portaelectrodo para formar el arco o mantenerlo estable.

La secuencia de control deseada es la siguiente:

1. Antes de realizar cualquier prueba será necesario que el dispositivo se posicione desde un punto de partida fijo. Es decir que al prender el control lo primero que haga es encerse. Los motores m_1 y m_2 deben accionarse.
2. Luego de encerse se debe tener la opción de determinar dos parámetros muy importantes dentro de la soldadura, la longitud del arco y soldadura deseada.
3. A continuación será necesario que el control efectúe la formación del arco manualmente. Para esto se necesitara que m_2 pueda descender el portaelectrodo. Este paso podría obviarse si se tuviera una maquina donde el arco se forme por alta frecuencia.
4. Una vez que el arco se ha formado se necesitara que m_1 comience el avance del portaelectrodo y realice la soldadura.
5. La soldadura terminaría cuando se considere que la longitud de la soldada es adecuada, entonces se corta el paso de energía.

Control y elementos electrónicos necesarios.

De la secuencia anterior se enumeraran las entradas en la Tabla 3.10. Además de los 7 pulsadores se necesitara también un switch ON/OFF que alimente todos los circuitos. Dentro de las salidas estarán dos motores e implícitamente incluidos 4 relés para los respectivos cambios de giro, además de tres LCD que indiquen las secuencias realizadas por los microcontroladores.

Tabla 3.10: Entradas al circuito.

Secuencia	Entradas
1	1 pulsador
2	4 pulsadores
3	1 pulsador
4	1 pulsador

Circuito electrónico

Este circuito está pensado para que lo realicen 3 microcontroladores. La utilización de tres en lugar de dos se debe a que se intenta realizar un pequeño sistema que permita sincronizar con mayor precisión los movimientos de cada uno de los motores.

Al utilizar dos microcontroladores los movimientos que realicen los motores podrían efectuarse pero no serian muy coordinados ya que cada microcontrolador trabajaría independientemente de lo que esté ocurriendo con el otro. Esto es considerado un problema sobre todo para la secuencia de encerado y soldado. Así se determinó que deben existir tres circuitos, dos esclavos para los motores tanto de continua y PAP y un circuito maestro para el control sincronizado de ambos. Los microcontroladores utilizados son un PIC 16F77A y dos PIC 16F628A

Para este sistema existe un todo llamado maestro (microcontrolador 16F77A) que recibe información de sus esclavos (microcontroladores 16F628A para cada uno de los motores), la procesa y solamente si cumple con los requerimientos de programación da paso a la ejecución de alguna línea. Este trabajo trata de utilizar este principio para mejorar el control de los motores.

En este caso el dispositivo posee entradas como los pulsadores y fines de carrera. Estas entradas envían información a los ESCLAVOS y estos luego al MAESTRO. Las salidas que poseen son aquellas de los microcontroladores (16F77A y 16F628A) que van hacia los relés y sus LCDs. Hay que indicar que cada circuito posee su LCD que indica el procedimiento que realiza cada uno de los tres controles. A continuación se indica la secuencia del circuito para el procedimiento de soldadura.

Al encender el circuito, El LCD del MAESTRO indica "PULSAR ENCERAR", después de pulsarlo este indica a los esclavos que pueden alimentar eléctricamente los motores, que solo dejaran de hacerlo cuando pequeñas cejas ubicadas adecuadamente en lugares del dispositivo pisan los fines de carrera; estos fines de carrera son entradas que llegan a los PICs y que le indican que cada uno de estos ha llegado a su posición inicial. A continuación los PICs están listos para recibir los parámetros que son:

- **PIC 16F628A para m_1** : "SELECCIONAR CARRERA". A través de los pulsadores **CARRERA +** y **CARRERA -**
- **PIC 16F77A**: "SELECCIONAR PASO". Esto se logra presionando los pulsadores **PASO +** o **PASO -** , datos que luego se envían al **PIC 16F628A para m_2**

Estos parámetros se podrán observar en los LCDs pertenecientes a cada microcontrolador. Una vez ingresados los parámetros el siguiente paso es presionar el pulsador "SOLDAR" pero antes se debe considerar:

- Si la máquina de soldar forma el arco por alta frecuencia, en cuyo caso se procedería a presionar el pulsador "SOLDAR" y permitir el flujo de corriente o;
- Si la maquina no es de alta frecuencia, para lo cual se ha considerado formar el arco por frotamiento, para esto existe un pulsador adicional conectado a un relé que permite el descenso del portaelectrodo hasta que se encuentre en contacto con la placa. Y una vez formado el arco se presiona "SOLDAR".

Luego de presionar "SOLDAR" se debe permitir el flujo de gas y corriente a través del portaelectrodo. La programación y el circuito de control pueden verse en los Anexos 7, 8, 9 y 10.

3.4 Funcionamiento del dispositivo.

Para llevar a cabo un adecuado funcionamiento del dispositivo se deben seguir los siguientes pasos:

1. Enchufamos los 2 conectores macho y hembra de la caja de control. Además se conecta la fuente que alimenta los circuitos y los motores.
2. Presionamos el pulsador ENCERAR, esto toma un máximo de 30 segundos.
3. Montamos el portaelectrodo en el dispositivo, dándole una inclinación de 5 a 10 grados.
4. Ubicamos bajo el portaelectrodo las placas a soldarse.
5. Seleccionamos en el control, la carrera del porta electrodo y el paso (que controla la longitud del arco).
6. Presionamos "Soldar" y accionamos el switch que permite el flujo de corriente y gas de protección.
7. Por último dejamos de accionar el switch que en este caso interrumpirá el flujo de corriente y gas de protección.

CAPÍTULO IV

4. EXPERIMENTACIÓN

Para realizar una soldadura adecuada se debe hallar la ventana operativa de cada una de las juntas. La ventana operativa contiene parámetros fundamentales como por ejemplo: el flujo de gas, amperaje, preparación de material, separación entre materiales, diámetro del electrodo, diámetro de la boquilla de gas, diámetro del material de aporte, longitud de arco, inclinación del portaelectrodo, entre otros. Es complicado hallar aquel conjunto de parámetros que lleven a una soldadura adecuada entre el acero inoxidable y el acero al carbono.

Si bien existen datos de algunas referencias [10] para soldadura entre materiales similares y disímiles en el proceso GTAW, estos deben ser ajustados a las condiciones en las que se efectúan las soldaduras de este trabajo; es así que las mejores condiciones para cada aplicación deberán determinarse solamente mediante pruebas. Se ha utilizado el formato dado en la referencia [13] para anotar todos los datos que especifican el procedimiento de soldadura (Welding Procedure Specification- WPS, por sus siglas en inglés).

Luego de muchas pruebas se logró hallar la ventana operativa para cada una de las juntas. Los WPS para soldaduras aceptables se indican desde el Anexo 1 al 6.

4.1 Preparación de los materiales a soldar

En la soldadura de los aceros inoxidables y otro tipo de materiales la preparación del material es importante para obtener una soldadura adecuada.

a) Preparación de las juntas y diseño de la unión

El diseño de la junta irá de acuerdo con el tipo de metal que va a soldarse, las propiedades físicas que se esperan de la soldadura, si se deberá o no usar metal de aporte y los costos de preparación antes y después de soldar.

Los principales tipos de uniones que se utilizan en soldadura TIG son: a tope, a traslape, en esquina, de orilla y en T. Puede haber otro tipo de combinaciones que muchas veces son una mezcla de dos o más de los diseños básicos de la unión. La soldadura manual de placas con espesores de hasta 4 mm se los puede realizar con una unión a tope; no obstante en el procedimiento semiautomático no hubo suficiente penetración. Así se decidió realizar un bisel con un ángulo que va de 28° a 36° para mejorar la penetración. La Figura 4.1 muestra la sección transversal de las placas a soldar, debido al ángulo de biselado la longitud de separación en la parte superior de las placas va de 1.5 a 2 mm.

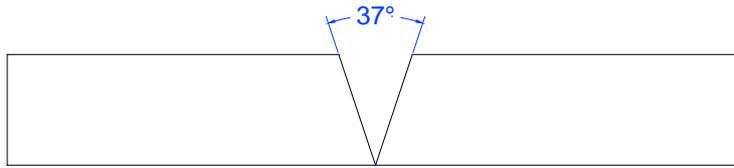


Figura 4.1: Ángulo de apertura entre placas para soldadura semiautomática GTAW

Para desbastar a la placa en este ángulo se utilizó un esmeril, teniendo cuidado de refrigerar al material para evitar cualquier cambio microestructural.

b) Limpieza previa y preparación de la superficie

La limpieza es un requisito importante para realizar cualquier tipo de soldadura. Muchas de estas se hechan a perder debido a que no fueron bien limpiadas y a la mala preparación de la superficie. Es recomendable que las juntas estén libres de grasa, suciedad y óxidos. Así, para obtener superficies adecuadas de los materiales a soldar se ha utilizado discos esmeriladores para acero y acero inoxidable.

c) Plantillas y plancha de retención

Estas son útiles para el trabajo de producción, las soldaduras se pueden hacer rápidamente y en forma uniforme. También se pueden espaciar para distribuir adecuadamente la soldadura. Uno de los componentes principales de una plantilla para soldar es la plancha de retención.

Las planchas de retención tienen 3 importantes funciones:

1. Sostener la soldadura derretida y manejar el contorno de la raíz de la soldadura.
2. Proteger la raíz de la soldadura de la atmósfera.
3. Ayudar a enfriar la soldadura a la temperatura deseada.

Generalmente se utiliza cobre como material de retención. Si la placa de retención de cobre presenta algún problema de contaminación generalmente se recubre con cromo. La plancha de retención es una barra sólida sin embargo algunas veces se modifica de tal manera que el gas inerte pueda introducirse en la raíz de la soldadura para proteger a los metales del aire.

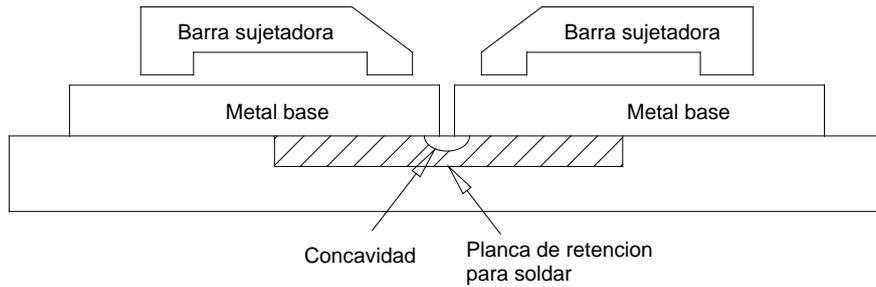


Figura 4.2: Plantilla de soldadura [9]

Si la plancha de retención es plana, el fondo de la soldadura será ligeramente cóncavo debido a la contracción de la soldadura durante el enfriamiento. Para evitar este problema deberá estriarse ligeramente debajo de la unión. Cuando se desea hacer una ranura se recomiendan las dimensiones de la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Dimensiones de la ranura en placas de retención [9]

Espesor de la placa a soldar	Dimensiones de la ranura	
	Profundidad	Ancho
1,2	0,8-1,2	3,2
1,6	1,2-1,6	4,8
2,0	1,6-1,9	5,6
2,8	1,9-2,4	5,6
3,1	2,4-3,1	5,6-7,9
4,8	3,1-3,9	9,5
6,4	3,9-4,8	9,5-11,1
9,5	3,9-4,8	9,5-12,7

d) Limpieza posterior

La soldadura TIG se hace sin fundentes, por lo tanto la única limpieza se hace para tratar la decoloración causada por el calor y para quitar los óxidos metálicos del depósito de soldadura y la zona afectada por el calor. Esto se logra con el uso de productos químicos adecuados. Antes de realizar los ensayos de doblado y tracción, muchas veces es necesario esmerilar los excesos de soldadura de tal manera que las probetas tengan superficies uniformes.

4.2 Soldadura GTAW de materiales diferentes

Previo a soldar materiales diferentes se ha realizado la soldadura entre materiales similares, esto ayudará a entender los cambios metalúrgicos que experimentan las soldaduras disímiles con respecto a las similares.

Selección del material de aporte para la soldadura de materiales similares y disímiles

Para las soldaduras entre aceros inoxidable y soldaduras disímiles el material de aporte utilizado fue el ER-316L. La composición de esta barra de aporte se muestra en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Composición química del material aportado a las soldaduras. [8]

Clasificación AWS	Número UNS	Composición, % en peso								
		C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Cu
ER-316L	S31683	0.03	18 a 20	11 a 14	2 a 3	1 a 2.5	0.3 a 0.65	0.3	0.3	0.75

La selección del aporte ER-316L para las juntas entre los aceros inoxidable AISI 304, AISI 430 y para las juntas disímiles, es decir: AISI 430 – AISI 304, AISI 430 – AISI 1008 y AISI 304 - AISI 1008; fue llevar a las microestructuras hacia un porcentaje bajo de ferrita que ayude a obtener buenas propiedades mecánicas en la junta.

En la Figura 4.3 se observa la posición de los materiales utilizados sobre el diagrama de Schaeffler para los valores de cromo y níquel equivalente que se indican en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Cr y Ni equivalente para los materiales utilizados

Material	Cr Equivalente %	Ni Equivalente %
Acero	0,1	2,6
AISI 430	18.5	4,0
AISI 304	20.5	12.7
ER-316-L	22.3	14.7

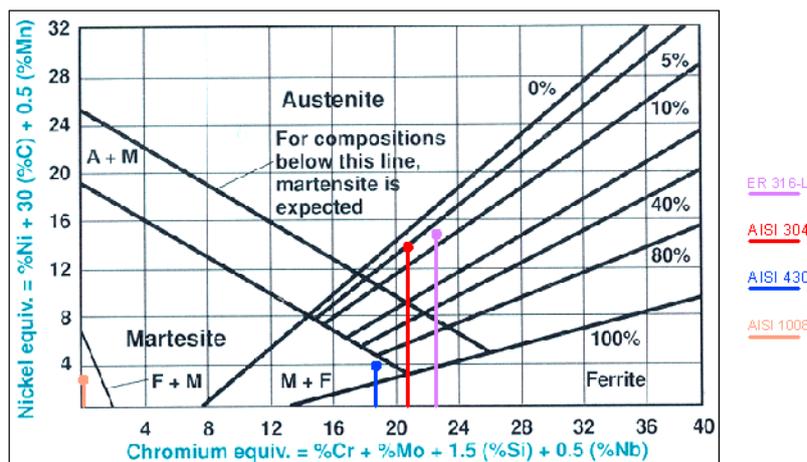


Figura 4.3: Posición de los materiales en el D. de Schaeffler, según Cr y NI equivalente
Porcentaje de dilución

De acuerdo al diseño de la junta esta tendrá un porcentaje de dilución de 33 %, este dato se lo obtuvo de la referencia [16] con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ dilución} = \frac{s}{s+S} \quad (21)$$

Donde:

s: área subrayada, mm²

S: área total del pozo de soldadura, mm²

La Figura 4.4 muestra las dimensiones promedio para los diferentes pozos de soldadura obtenidos en este trabajo.

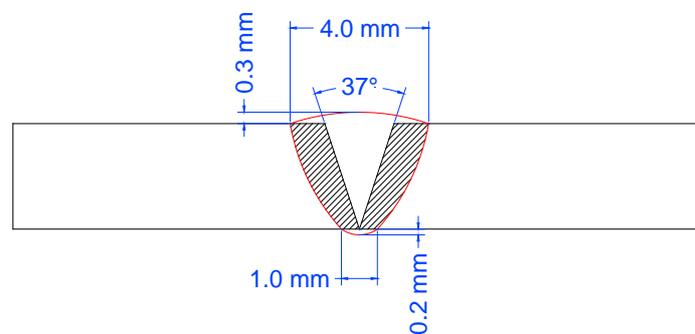


Figura 4.4: Esquema para el cálculo del porcentaje de dilución del material base.

Con las dimensiones de la Figura 4.4 es posible obtener un dato real del porcentaje de dilución, los valores de las áreas son los siguientes:

$$s = 4,55 \text{ mm}^2$$

$$S = 9,05 \text{ mm}^2$$

$$\% \text{ dilución} = \frac{4,55}{4,55 + 9,05}$$

$$\% \text{ dilución} = \frac{4,55}{13,6} = 33$$

Determinación de los constituyentes en el metal soldado

Los puntos donde se hallan cada una de las soldaduras en el Diagrama de Schaeffler con el metal de aporte ER-316L y para un porcentaje de dilución del 33%, se muestran desde la Figura 4.5 a la Figura 4.9.

La Figura 4.5 indica que la microestructura presente para la soldadura del acero inoxidable austenítico AISI 304 es austenita + 6% de ferrita. La Figura 4.6 muestra el punto donde se encuentra la soldadura del acero inoxidable ferrítico AISI 430 su microestructura está compuesta de austenita + 18% de ferrita.

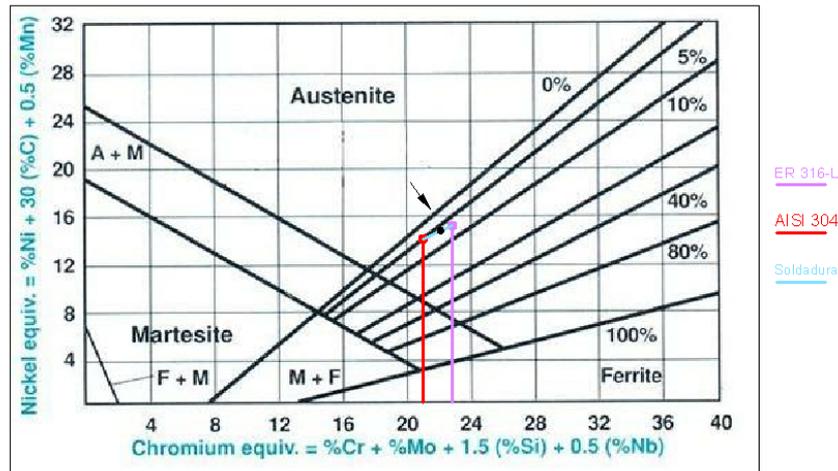


Figura 4.5: D. de Schaeffler de la junta AISI 304, 33% de dilución, aporte ER 316L

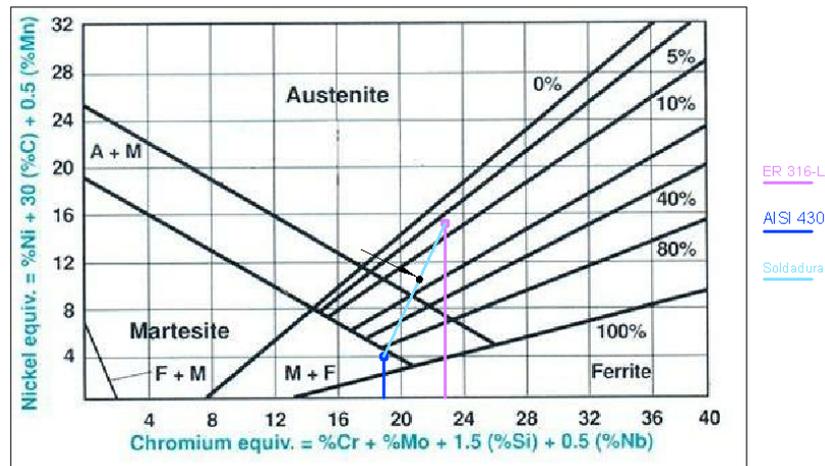


Figura 4.6: D. de Schaeffler de la junta AISI 430, 33% de dilución, aporte ER 316L

La Figura 4.7 muestra el diagrama de Schaeffler para la soldadura entre el acero inoxidable austenítico AISI 304 y el acero inoxidable ferrítico AISI 430. La microestructura resultante consta de austenita + 11% de ferrita.

La Figura 4.8 indica una microestructura completamente austenítica para la soldadura disímil entre el acero AISI 1008 y el acero inoxidable austenítico AISI 304.

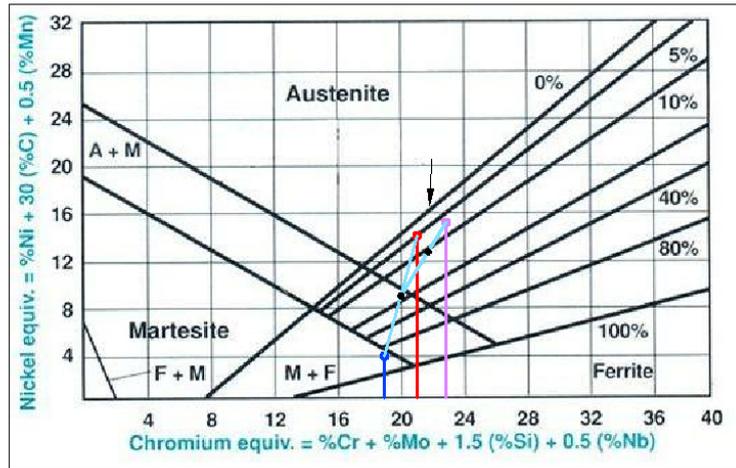


Figura 4.7: D. de Schaeffler de la junta AISI 304-AISI 430, 33% de dilución, aporte ER 316L

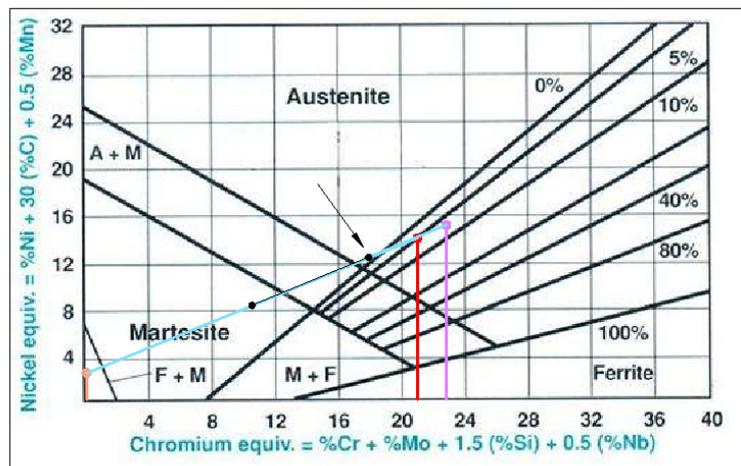


Figura 4.8: D. de Schaeffler de la junta AISI 1008-AISI 304, 33% de dilución, aporte ER 316L

La Figura 4.9 indica que la soldadura disímil entre el acero AISI 1008 y el acero inoxidable ferrítico AISI 430 consta de: austenita + 20% de martensita + 5% de ferrita.

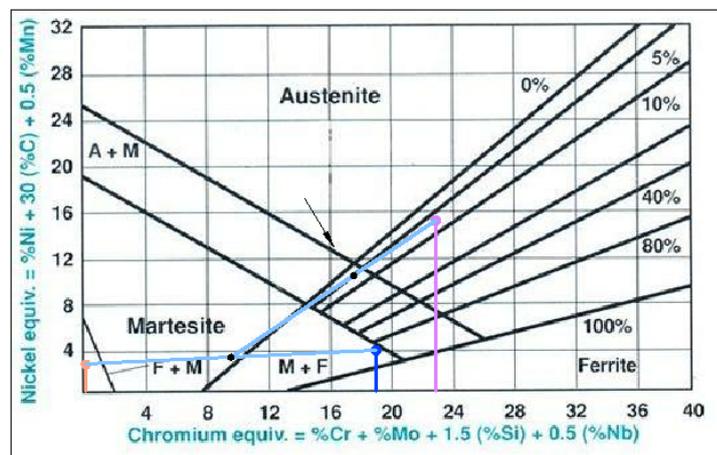


Figura 4.9: D. de Schaeffler de la junta AISI 1008-AISI 430, 33% de dilución, aporte ER 316L

Como se aprecia en las figuras anteriores el metal de aporte seleccionado es útil y lleva a la mayoría de las juntas soldadas hacia un porcentaje de ferrita que va de 5 a 10%. Solamente la soldadura del acero inoxidable AISI 430 posee 18% de ferrita.

4.3 Metalurgia de la soldadura

Técnica de ataque

La microestructura de los aceros inoxidables puede ser revelada usando una variedad de ataques. El metal soldado y muchas veces la ZAC no son homogéneos, por tanto estos tienden atacarse diferente que el metal base.

Las técnicas de ataque pueden ser divididas en métodos químicos, electrolíticos y de manchado. De estos, los métodos escogidos han sido el electrolítico para los aceros inoxidables y el químico para el acero al carbono. El reactivo químico utilizado para el acero al carbono ha sido nital al 2 y 4 %, mientras que el ácido que fue utilizado para los aceros inoxidables se indica en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4: Ataque electrolítico para aceros inoxidables. [8]

Ataque	Materiales	Composición/uso	Notas
Acido Oxálico, 10%	Ferríticos, austeníticos	10g de Acido oxálico, 90 ml de H2O a temperatura ambiente. Ataque de 3-6 V y de 5-60 s	Muy efectivo para revelar los bordes de grano, particularmente si hay precipitación de carburos. Esta técnica es usada muy a menudo para detectar sensitización

Medición del tamaño de grano

Para la medición del tamaño de grano se utilizó el método de intercepción y comparación. El tamaño de grano ASTM por el método de intercepción utiliza la siguiente ecuación:

$$G = 10 - 6.6439 \times \log \left(\frac{E_g}{10} \right) \quad (22)$$

Donde

G: Tamaño de grano

E_g : Diámetro del grano, μm

4.3.1 Soldadura de acero inoxidable ferrítico AISI 430

Metalurgia física

Las Figuras 4.10 y 4.11 muestran la microestructura de este acero en condiciones iniciales. Se observa una estructura ferrítica con presencia de carburos propios de este material.



Figura 4.10: Microestructura de un acero inoxidable AISI 430. Se puede observar los precipitados de carburos (color negro). Atacado con ácido oxálico. Ampliación 200x.

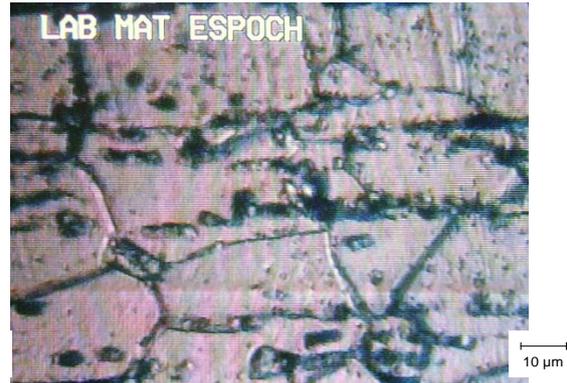


Figura 4.11: Acero inoxidable AISI 430. Se puede observar los precipitados de carburos (color negro). Atacado con ácido oxálico. Ampliación 400x.

Para la microestructura de este acero inoxidable el tamaño de grano obtenido por el método de intercepción y de comparación se indica en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Tamaño de grano ASTM del acero inoxidable AISI 430

Material	Tamaño de Grano ASTM		
	Método de comparación	Método de Intercepción	
		Horizontal	Vertical
AISI 430	7	6 a 7	6 a 7

Metalurgia de la soldadura en la junta AISI 430-AISI 430

- Zona de fusión

Las Figuras 4.12, 4.13 y 4.14 muestran la microestructura en la zona de fusión. Los granos están compuestos de ferrita, martensita y precipitados.

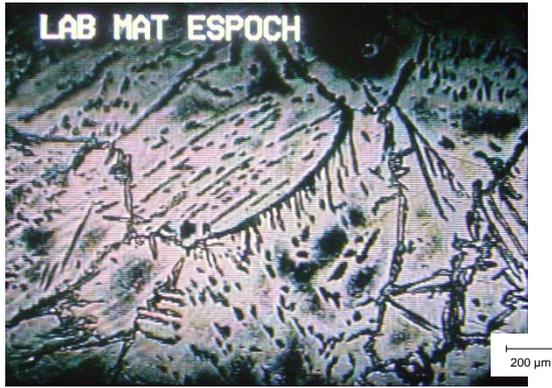


Figura 4.12: Zona de Fusión de la junta AISI 430-AISI 430. Se puede observar granos de ferrita rodeada por Martensita en los bordes de grano. Atacado con ácido oxálico. Ampliación 25x.



Figura 4.13: Zona de Fusión. Pequeñas cantidades de precipitados (color negro) dentro de los granos ferríticos. Atacado con ácido oxálico. Ampliación 50x.



Figura 4.14: Zona de Fusión. Granos de ferrita bifásica. En el centro del grano las partes negras corresponden a carburos o precipitados. Atacado con ácido oxálico. Ampliación 100x.

Predicción de la microestructura

El factor ferrítico de Kaltenhauser para la determinar la formación de martensita en el acero inoxidable AISI 430 es:

$$K - factor = \%Cr + 6\%Si + 8\%Ti + 4\%Mo + 2\%Al - 40\%(C + N) - 2\%Mn - 4\%Ni \quad (23)$$

Para la composición del acero inoxidable ferrítico AISI 430 de la Tabla 4.6 el valor del factor K es:

Tabla 4.6: Composición del acero inoxidable AISI 430

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0.10	1.00	1.00	0,040	0,030	16.0	0.50
máx.	máx.	máx.	máx.	máx.	18.0	máx.

$$K - factor = 16 + 6 * (0,03) - 40(0,10 + 0,05) - 2 * (1,00) - 4(0,05)$$

K – factor = 7,98

El valor anterior no excede a $K = 17.0$, por lo que es de esperarse que la microestructura de este acero no sea totalmente ferrítica.

Como refuerzo a la información obtenida en el Diagrama de Schaeffler se ha decidido utilizar el diagrama de Balmforth para predecir la probable presencia de martensita en la microestructura de la soldadura. La Figura 4.15 muestra la posición en el diagrama de Balmforth para la composición del acero inoxidable ferrítico AISI 430.

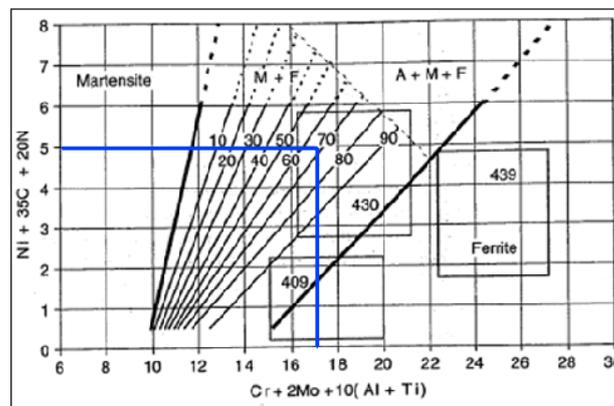


Figura 4.15: Ubicación del acero inoxidable AISI 430 en el diagrama de Balmforth

De la Figura 4.15, la probable microestructura de la soldadura podría estar compuesta de un 68 a 70% de ferrita y de 30 a 32 % de martensita, recordando que los valores anteriores solo están basados en la composición del material soldado sin considerar el metal de aporte.

El diagrama de Schaeffler de la Figura 4.6 indica que la microestructura presente en el metal fundido estará compuesta de austenita + 18% de ferrita; pero adicional a esta información también es posible que existan cantidades de ferrita y martensita como las que determina el diagrama de Balmforth.

- **Zona afectada por el calor**

La microestructura de la mayoría de los aceros inoxidables ferríticos consiste en una mezcla de ferrita y carburos. Las Figuras 4.16 y 4.17 muestran la ZAC en un acero inoxidable AISI 430. Los granos de ferrita son largos y el límite de grano tiene una continua línea de martensita que se ha formado desde la austenita.



Figura 4.16: ZAC en la soldadura de un acero inoxidable AISI 430. Se pueden observar los carburos formados dentro de los granos de ferrita. Atacado con ácido oxálico. Ampliación 25x.



Figura 4.17: Frontera de fusión. Precipitados que se han formado en el interior del grano ferrítico con límites de grano martensítico. Precipitados %54, martensita 16 %, ferrita 30 %. Ataque electrofítico. Ampliación 50x.

4.3.2 Soldadura de acero inoxidable austenítico AISI 304

Metalurgia física

Los aceros inoxidables austeníticos son formulados y procesados termo-mecánicamente lo cual hace que la microestructura sea primordialmente austenita. Una dependencia en el balance de elementos que promueven la ferrita y austenita provocaran que la microestructura final sea austenítica o una mezcla de la austenita y ferrita.

La microestructura del acero inoxidable austenítico en condiciones iniciales se muestra en la Figura 4.18 y 4.19. En este caso se pueden ver granos de austenita con presencia de residuos de ferrita de alta temperatura (ferrita delta) alineada a lo largo de la dirección de laminado. Esta ferrita delta resulta de la segregación de elementos promotores (primordialmente Cr) durante la solidificación y el proceso termo-mecánico. Usualmente está presente en un volumen relativo bajo.

Aunque no es considerado deterioro en la mayoría de aplicaciones, la presencia de ferrita delta en la microestructura puede reducir la ductilidad y potencialmente la resistencia de los aceros inoxidables austeníticos después de soldados. La ferrita delta puede dar lugar a la precipitación de carburos $(Cr, Fe)_{23}C_6$, $(Cr, Fe, Mo)_{23}C_6$ y la fase sigma la cual es causante de la fragilidad en los aceros inoxidables. La precipitación de los carburos citados ha recibido considerable atención debido a que tienen efectos sobre la resistencia a la corrosión. Las Figuras 4.20 y 4.21 muestran microestructuras de un acero inoxidable austenítico 304.

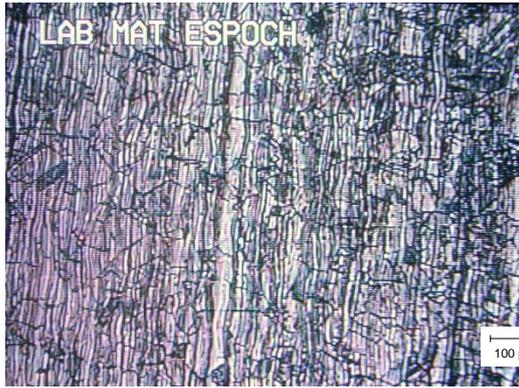


Figura 4.18: Acero inoxidable austenítico 304. Granos de austenita con presencia de ferrita delta alineada con la dirección de laminado. Atacado con ácido oxálico. Ampliación 50x.



Figura 4.19: Igual a la Figura 4.18 pero a una ampliación de 100x.

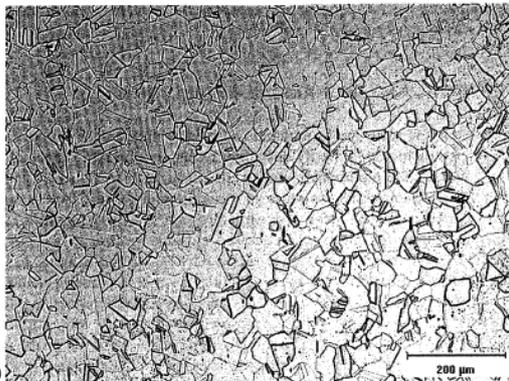


Figura 4.20: Microestructura de una placa de acero inoxidable tipo 304. Completamente austenítico [8]

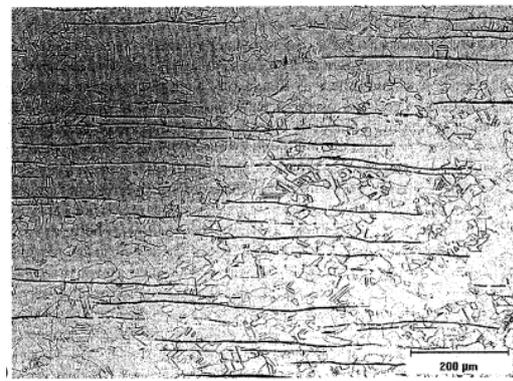


Figura 4.21: Microestructura de una placa de acero inoxidable tipo 304. Austenita con residuos de ferrita. [8]

El tamaño de grano de esta microestructura obtenido por el método de intercepción y de comparación se indica en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7: Tamaño de grano ASTM del acero inoxidable AISI 304

Material	Tamaño de Grano ASTM		
	Método de comparación	Método de Intercepción	
		Horizontal	Vertical
AISI 304	6	4	5

Metalurgia de la soldadura en la junta AISI 304-AISI 304

- Zona de fusión**

La microestructura de la zona de fusión a temperatura ambiente de un acero inoxidable austenítico depende de las características de solidificación y subsecuentes transformaciones hasta el estado sólido.

Los aceros inoxidables austeníticos pueden solidificar desde ferrita primaria o austenita primaria dependiendo de la composición específica. Pequeños cambios en la composición del

sistema de aleación promueven un cambio de ferrita primaria a austenita primaria. El rango de composición de los aceros inoxidable austeníticos es suficientemente amplio para que ambos modos de solidificación sean posibles.

De la Figura 4.22 a la 4.25 se muestran las microestructuras en la zona de fusión. Se observa una solidificación tipo FA (Ferrita – Austenita) con morfología de ferrita columnar y tipo placas.

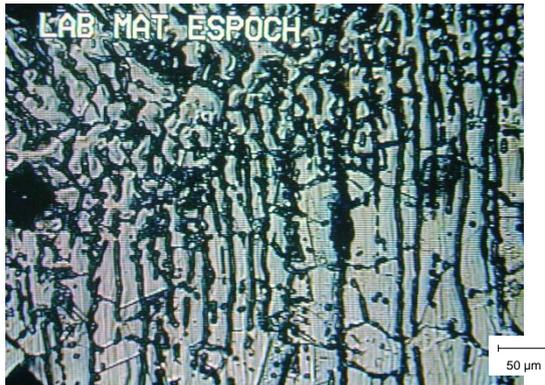


Figura 4.22: Intercara entre la zona de fusión y la ZAC (Parte inferior). Se puede apreciar un tipo de solidificación FA en la zona de fusión sobre el lado superior. Atacado con ácido oxálico. Ampliación 100x.



Figura 4.23: Zona de Fusión. Tipo de solidificación FA. Mezcla de ferrita columnar y tipo placas. Atacado con ácido oxálico. Ampliación 100x.



Figura 4.24: Zona de fusión. Tipo de solidificación FA con morfología de ferrita columnar y tipo placas. Atacado con ácido oxálico. Ampliación 100x



Figura 4.25: Zona de fusión. Tipo de solidificación FA. Morfología de ferrita (negra). Atacado con ácido oxálico. Ampliación 400x

- **Zona afectada por el calor**

Las Figuras 4.26 y 4.27 muestran la microestructura en la zona afectada por el calor. Se observa granos de austenita y una ligera disminución de cantidad de ferrita.

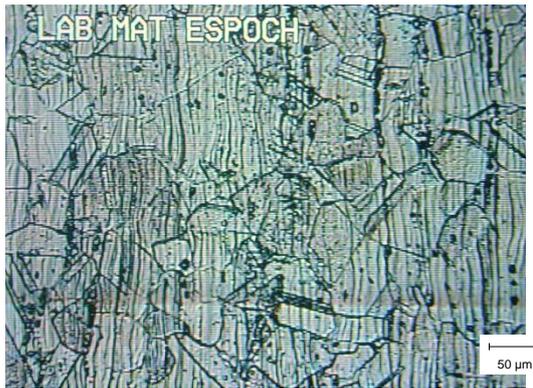


Figura 4.26: ZAC. Granos austeníticos. Las líneas verticales corresponden a ferrita delta. Atacado con ácido oxálico. Ampliación 100x.

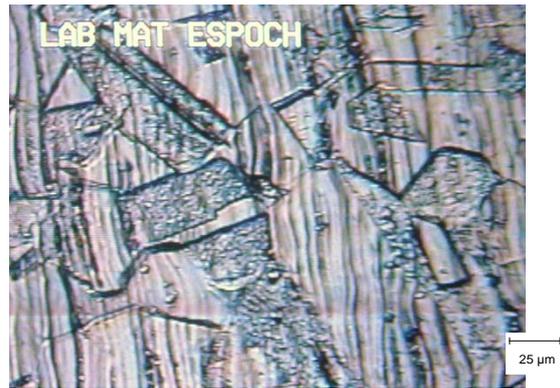


Figura 4.27: ZAC. Igual a la Figura 4.26 pero a mayor ampliación. Atacado con ácido oxálico. Ampliación 200x

La Figura 4.28 muestra la formación de ferrita en la ZAC.



Figura 4.28: Formación de ferrita en la ZAC para la soldadura del acero inoxidable AISI 304. Atacado con ácido oxálico. Ampliación 100x.

4.3.3 Microestructura del acero de bajo contenido de carbono AISI 1008

La placa de acero al carbono utilizada en este trabajo es la de uso común para ciertas aplicaciones industriales. Para determinar el porcentaje de carbono aproximado se ha comparado la microestructura obtenida con una de la referencia [6] de manera que se confirme la clasificación a la que pertenece el material con el que se va a trabajar. La microestructura que se ha observado en este acero se muestra en las Figuras 4.29 y 4.30.



Figura 4.29: Microestructura del acero utilizado en este trabajo. Se puede observar muy poca perlita en una matriz ferrítica. Atacado con nital 2%. Ampliación 100x.



Figura 4.30: Igual a Figura 4.29 con mayor ampliación. Puede apreciarse los pequeños sectores de perlita en ciertos granos. Ampliación 400x.

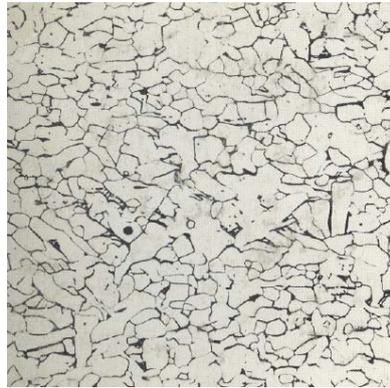


Figura 4.31: Acero de bajo contenido de carbono AISI 1008. Ampliación 250 x [6]

La Figura 4.29 muestra la microestructura ferrítica del acero de bajo carbono, una ampliación mayor se observa en la Figura 4.30 que permite apreciar con mayor facilidad los sectores perlíticos. Estas microestructuras pueden ser comparadas con la que se muestra en la Figura 4.31.

El porcentaje de carbono presente es aproximadamente 0.08 %. El tamaño de grano de esta microestructura obtenido por el método de intercepción y comparación se indica en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8: Tamaño de grano ASTM del acero de bajo carbono AISI 1008

Material	Tamaño de Grano ASTM		
	Método de comparación	Método de Intercepción	
		Horizontal	Vertical
AISI 1008	8	8	8

4.3.4 Soldadura disímil: AISI 1008 - AISI 304

Determinación de los constituyentes del metal soldado

En la Figura 4.32 se indica la predicción para la soldadura entre el acero AISI 1008 y el acero inoxidable austenítico AISI 304.

Sobre el Diagrama de Schaeffler en la Figura 4.32 se muestran varios puntos. Primeramente para determinar la microestructura del metal soldado se deben ubicar los puntos del acero AISI 1008 (en la zona F+M) y del acero inoxidable austenítico AISI 304 (zona austenítica). Si estos dos metales se fundieran sin material de aporte la composición se encontraría en la mitad de la línea que los une. Sin embargo un punto adicional, aquel del metal aportado, debe unirse ahora con aquel punto medio determinado.

La composición resultante (flecha negra) indica que el metal soldado posee una estructura en su gran mayoría austenítica.

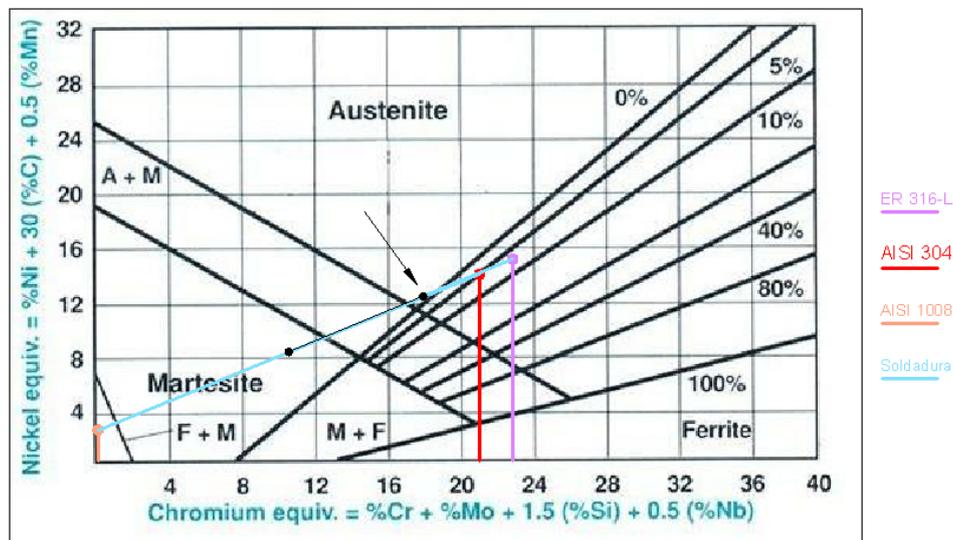


Figura 4.32: D. de Schaeffler de la junta AISI 1008-AISI 304. 33% de dilución, aporte ER 316L

Las Figuras 4.33 y 4.34 muestran la zona de fusión en esta soldadura. Se observa poca cantidad de ferrita en una matriz austenítica.



Figura 4.33: Zona de fusión. Solidificación tipo AF, posee ferrita eutéctica en una matriz austenítica. Atacado con ácido oxálico. Ampliación 50x.



Figura 4.34: Zona de fusión, solidificación tipo AF. Atacado con ácido oxálico. Ampliación 100x.

Las Figuras 4.33 y 4.34 muestran una microestructura diferente a la que se pudo observar en el metal fundido del acero austenítico AISI 304; se observa una solidificación tipo AF que se ha formado al final de la solidificación.

Región de transición en las fronteras de fusión

El diagrama de Schaeffler también puede ser útil para predecir la microestructura en la región de transición en las fronteras de fusión. En este caso la línea que une el metal de aporte con la mezcla del metal base pasa también por las regiones de: Ferrita + Austenita, Austenita, Austenita + Martensita y Ferrita + Martensita. Todas estas microestructuras pueden estar presentes en la estrecha región entre la ZAC y el metal fundido.

En las Figuras 4.35 y 4.36 se observa la frontera de fusión del acero AISI 1008. Debido al bajo contenido de carbono del metal base es probable que no exista una alta migración de carbono hacia la zona de fusión. En este caso la frontera de fusión estará libre de martensita.

Las zonas negras que delinean la frontera de fusión probablemente son precipitados o inclusiones. Atravesando la frontera y en dirección hacia el metal base se observa el aumento del tamaño de grano y también el incremento de perlita en la matriz ferrítica.

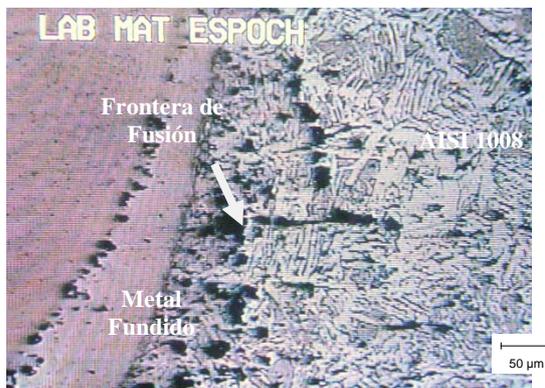


Figura 4.35: Frontera de fusión. Probablemente carburos (color negro) tanto en la frontera como en el metal base. Atacado con nital. Ampliación 100x.



Figura 4.36: Frontera de fusión. Atacado químicamente con nital. Ampliación 200x.

La frontera de fusión en el acero inoxidable AISI 304 se muestra en las Figuras 4.37 y 4.38. El ataque electrolítico deja apreciar una frontera con una cantidad razonable de ferrita que incluso se extiende hacia la ZAC, esta ferrita ayuda a evitar el crecimiento de grano, pero al mismo tiempo podría promover el debilitamiento del material en esta zona por la formación de la fase sigma a partir de la ferrita.

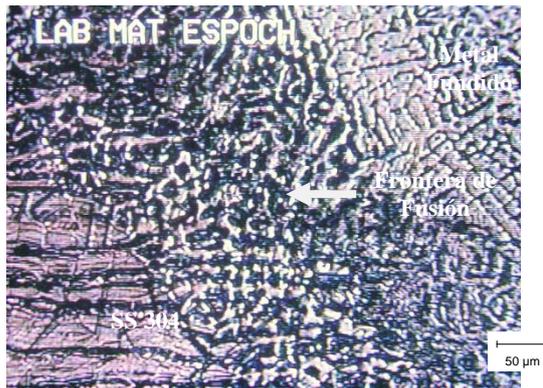


Figura 4.37: Frontera de fusión con buena cantidad de ferrita. Atacado con ácido oxálico. Ampliación 100x

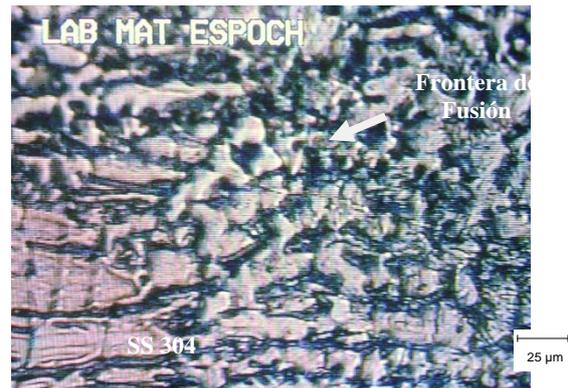


Figura 4.38: Frontera de fusión. Presencia de ferrita en la frontera. Atacado con ácido oxálico. Ampliación 200x.

Zona afectada por el calor

Para el acero AISI 1008 es necesario analizar las curvas de enfriamiento y sobreponerlas sobre el diagrama de transformación continua para determinar las microestructuras presentes en la ZAC al final de la solidificación. La Figura 4.39 muestra el diagrama de transformación continua del acero AISI 1010. Se ha utilizado este diagrama debido a que es el más aproximado a los rangos de composición del acero AISI 1008.

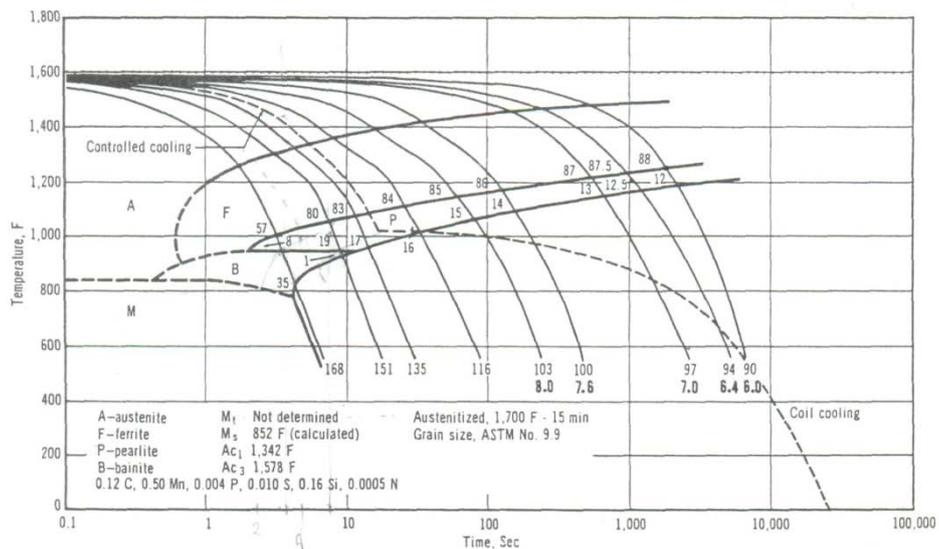


Figura 4.39: Diagrama CCT para el acero AISI 1010. [14]

Las curvas del ciclo térmico a diferentes distancias del foco de energía para la ventana operativa de esta soldadura (anexo 4) se muestran en la Figura 4.40.

AISI 1008

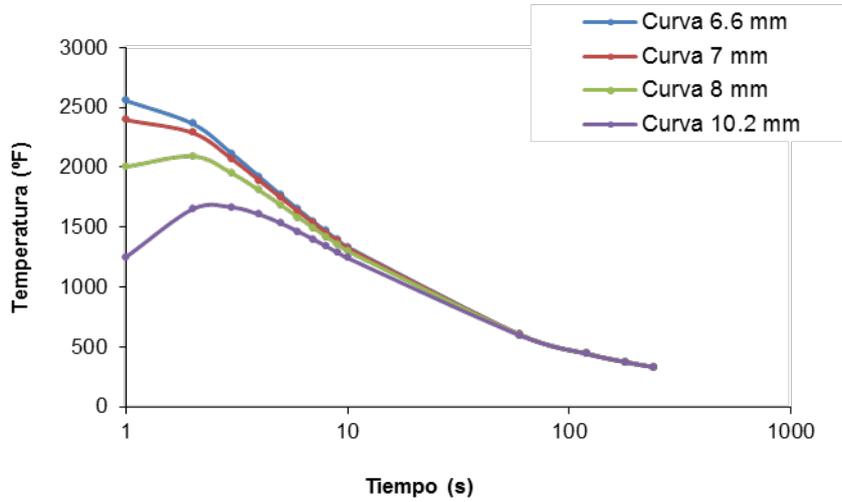


Figura 4.40: Curvas del ciclo térmico para el acero AISI 1008 en la junta AISI 1008-AISI 304.

Las fases presentes en la ZAC del acero AISI 1008 se las obtiene al montar las curvas de ciclo térmico sobre el diagrama de transformación continua, esto se observa en la Figura 4.41.

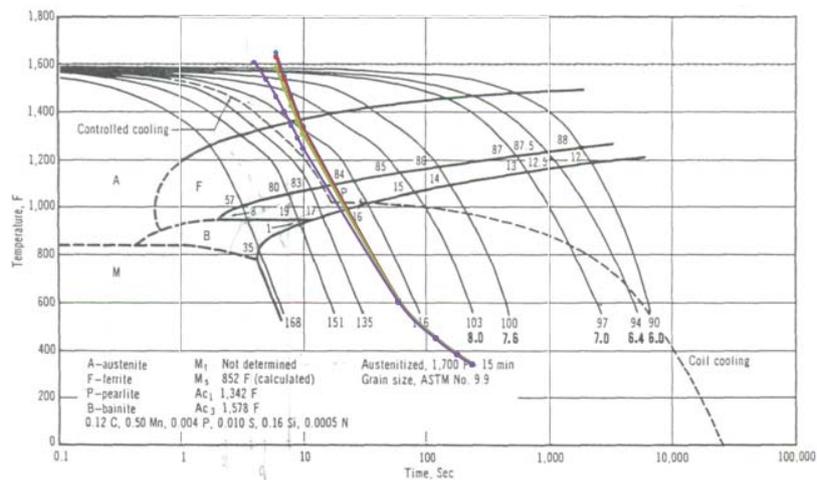


Figura 4.41: Curvas del ciclo térmico sobre el diagrama CCT.

La posición de las curvas (líneas de colores) sobre el diagrama CCT indica que la microestructura constará aproximadamente de: 16 a 17% de perlita + 83 a 84% de ferrita. Las Figuras 4.42 y 4.43 muestran la microestructura de la ZAC; se observa perlita media en una matriz ferrítica. Los puntos negros pertenecen a inclusiones.



Figura 4.42: ZAC en el acero AISI 1008. Perlita media en ferrita. Atacado con nital. Ampliación 100x.



Figura 4.43: ZAC en el acero AISI 1008. Igual a la Figura 4.42 con mayor ampliación. Atacado con nital. Ampliación 200x.



Figura 4.44: ZAC de acero inoxidable AISI 304. Se observa precipitados y ferrita en una matriz austenítica. Atacado con ácido oxálico. Ampliación 100x.

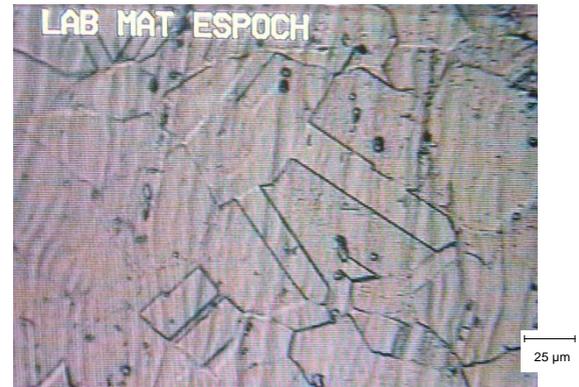


Figura 4.45: ZAC del acero inoxidable AISI 304. Microestructura formada por ferrita + austenita + carburo. Atacado con ácido oxálico. Ampliación 200x.

En la ZAC para el acero inoxidable austenítico AISI 304 se observa la precipitación de carburos y la formación de ferrita. Las Figuras 4.44 y 4.45 muestran las estructuras presentes en la ZAC; además de los precipitados en los granos de austenita se aprecia la presencia de ferrita delta.

4.3.5 Soldadura disímil: AISI 1008-AISI 430

Determinación de los constituyentes del metal soldado

La Figura 4.46 muestra el diagrama de Schaeffler y la composición del metal soldado (flecha); según el diagrama, la soldadura entre el acero AISI 1008 y el acero inoxidable AISI 430 presente en el metal soldado es: austenita + 20% de martensita + 5% de ferrita.

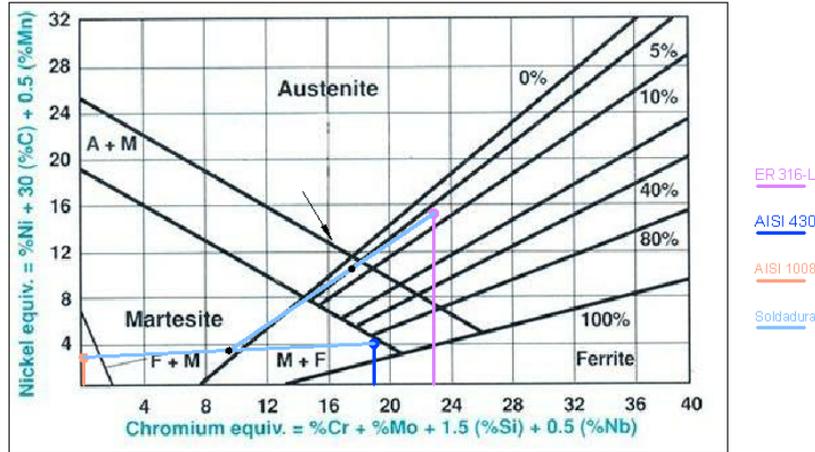


Figura 4.46: D. de Schaeffler de la junta AISI 1008-AISI 430. 33% de dilución, aporte ER 316L

Las Figuras 4.47 y 4.48 muestran los granos de austenita. Aunque el diagrama de Schaeffler indica que los constituyentes son austenita+ ferrita + martensita, la martensita no es fácilmente apreciable.



Figura 4.47: Zona de fusión. Granos austeníticos. Atacado con ácido oxálico. Ampliación 100x



Figura 4.48: Zona de fusión. Granos de austenita. Es muy difícil apreciar la martensita existente. Atacado con ácido oxálico. Ampliación 100x.

Región de transición en las fronteras de fusión

En las Figuras 4.49 y 4.50, se observa ciertas microestructuras que en el diagrama de Schaeffler se preveían. Las Figuras 4.51 y 4.52 muestran la frontera de fusión del lado del acero inoxidable ferrítico. En ambas se observa la transición de austenita (en la zona de fusión) a ferrita (ZAC). En estas figuras se observa el gran parecido de las morfologías austenítica (en la parte superior) y martensítica (en los bordes de grano ferrítico de la ZAC).

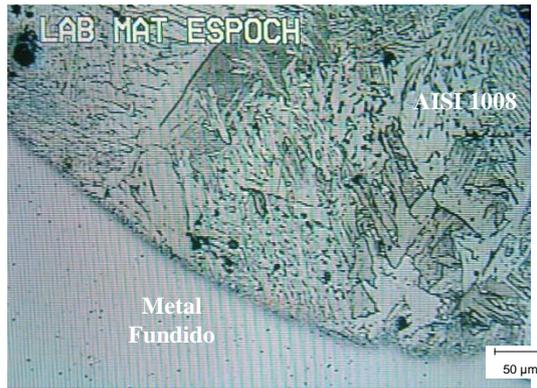


Figura 4.49: Frontera de fusión. Se puede observar una microestructura conformada por perlita en una matriz ferrítica. Atacado electrofílicamente. Ampliación 100x

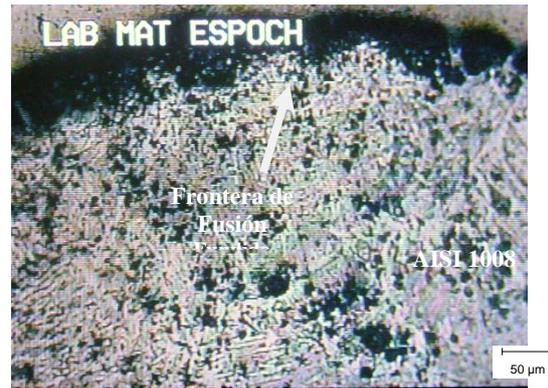


Figura 4.50: Frontera de fusión. Se puede observar mayor cantidad de precipitados dentro de la matriz ferrítica y en la frontera de fusión. Atacado con nital. Ampliación 100x

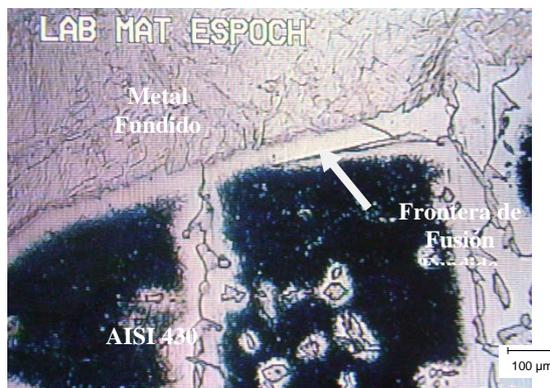


Figura 4.51: Frontera de fusión. Estructura martensítica y ferrítica en la frontera. Ampliación 50x.



Figura 4.52: Frontera de fusión. Igual a la figura anterior. Ampliación 100x.

Zona afectada por el calor

Las curvas de ciclo térmico para el acero AISI 1008 en esta soldadura se muestran en la Figura 4.53. La Figura 4.54 muestra las curvas del ciclo térmico superpuestas sobre el diagrama de transformación continua. Los porcentajes de las fases presentes son de: 83 a 84 % ferrita y 16 a 17% perlita. Los valores anteriores son iguales a los que se obtuvo en la soldadura disímil AISI 1008-AISI 304.

Las Figuras 4.55 y 4.56 muestran la zona afectada por el calor en el acero AISI 1008. Como se esperaba ha existido crecimiento del grano ferrítico por las altas temperaturas además se observa perlita media distribuida en la matriz ferrítica.

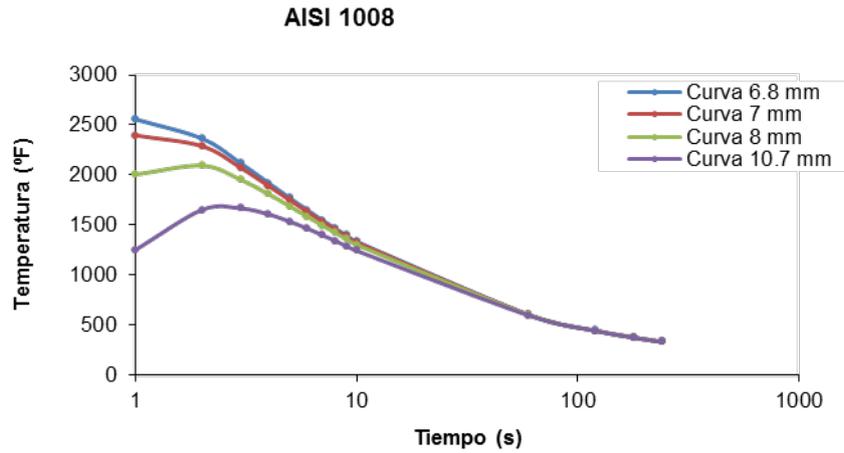


Figura 4.53: Curvas del ciclo térmico para el acero AISI 1008 en la junta AISI 1008-AISI 430.

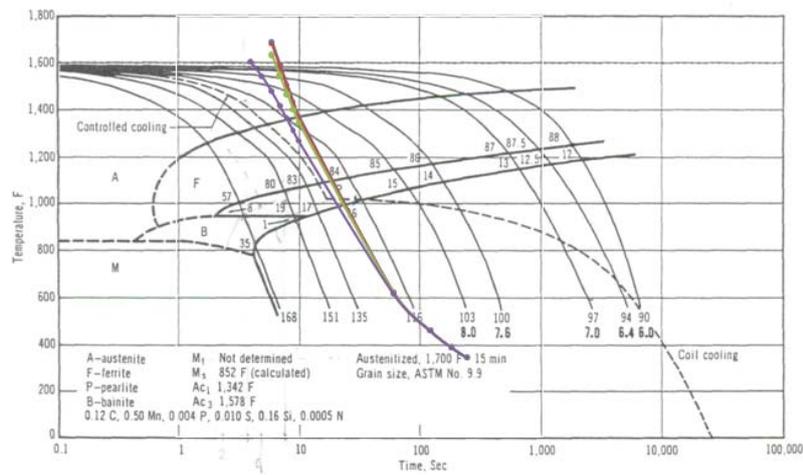


Figura 4.54: Curvas del ciclo térmico sobre el diagrama CCT.



Figura 4.55: ZAC en el acero AISI 1008. Perlita media en una matriz de ferrita alfa. Atacado con ácido oxálico. Ampliación 100x.



Figura 4.56: ZAC con mayor ampliación. Atacado electroquímicamente con ácido oxálico. Ampliación 400x

En las Figuras 4.57 y 4.58 se observa la ZAC para el acero inoxidable ferrítico AISI 430. Se aprecia el notable crecimiento de grano, la fina estructura martensítica rodeando los granos de ferrita bifásica y la precipitación de carburos dentro de los grano.

El metal base, parte inferior de la Figura 4.58, comparada con la microestructura del acero inoxidable ferrítico antes de soldar, Figura 4.10, hace notar la disminución en la cantidad de carburos y la formación de pequeñas cantidades de martensita. Esto se debe a que con el calentamiento los carburos tienden a disolver en austenita; esta austenita enriquecida en carbono se transformó en martensita debido a la tasa de enfriamiento luego de la soldadura.



Figura 4.57: ZAC del acero inoxidable AISI 430. Ferrita bifásica rodeada de martensita en los bordes de grano. Existe además precipitación de carburos dentro del grano de ferrita. Atacado con ácido oxálico. Ampliación 50x.

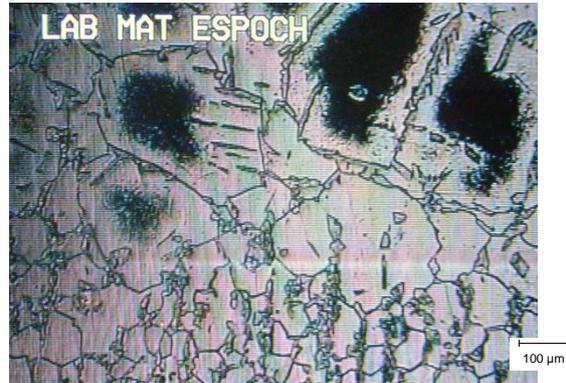


Figura 4.58: ZAC del acero inoxidable AISI 430 y MB (parte inferior). Se observan la notable diferencia entre los tamaños de grano y la presencia de martensita en el MB. Atacado con ácido oxálico. Ampliación 50x.

4.3.6 Soldadura disímil: AISI 430 - AISI 304

Determinación de los constituyentes del metal soldado

La Figura 4.59 muestra la posición de la soldadura entre el acero inoxidable austenítico AISI 304 y del acero inoxidable ferrítico AISI 430 utilizando el metal de aporte austenítico ER-316L.

La flecha indica la posición del metal soldado en el diagrama, la microestructura aproximada está compuesta de austenita + 11% de ferrita.

Las Figuras 4.60 y 4.61 muestran la microestructura en este tipo de soldadura. Las Figuras 4.62, 4.63 y 4.64 muestran mayores acercamientos.

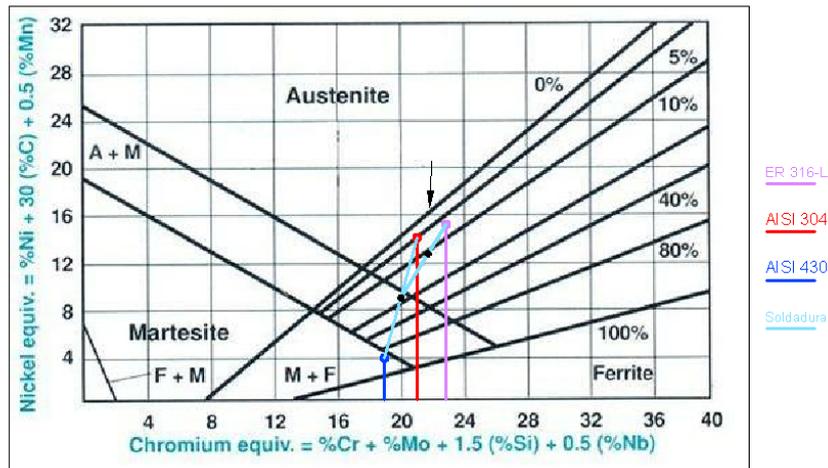


Figura 4.59: D. de Schaeffler de la junta AISI 304-AISI 430. 33% de dilución, aporte ER 316L

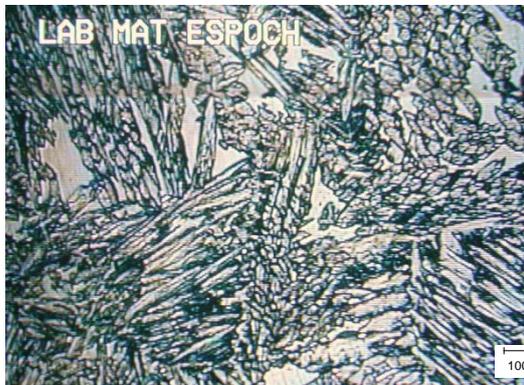


Figura 4.60: Zona de fusión. Estructura formada de austenita y ferrita (líneas negras) en completo desorden. Atacado con ácido oxálico. Ampliación 50x.

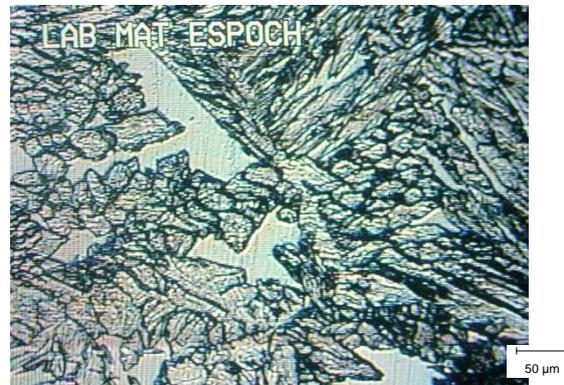


Figura 4.61: Zona de fusión. Igual a la figura anterior con mayor acercamiento. Ampliación 100x.

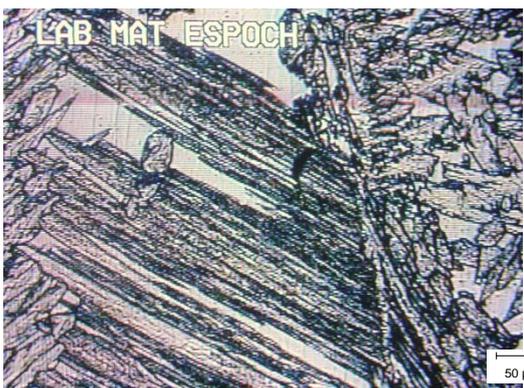


Figura 4.62: Zona de fusión. Las líneas negras en completo desorden son ferrita. Atacado con ácido oxálico. Ampliación 100x



Figura 4.63: Zona de fusión, figura anterior a mayor ampliación. Se observa claramente la ferrita. Atacado con ácido oxálico. Ampliación 200x

La Figura 4.65 muestra otro sector de la zona de fusión. A más de ferrita y austenita observadas en las figuras anteriores se aprecia ciertas partes negras, probablemente precipitados de carburo que se han formado dentro del pozo de soldadura.



Figura 4.64: Zona de fusión. Ferrita presente en una matriz austenítica. Atacado con ácido oxálico. Ampliación 400x



Figura 4.65: Metal fundido. Austenita + ferrita y probablemente precipitados de carburo (sectores negros). Atacado con ácido oxálico. Ampliación 50x

Región de transición en las fronteras de fusión

La Figura 4.66 muestra la región de transición del acero inoxidable ferrítico AISI 430 que ha formado martensita en los límites de grano ferrítico y carburos en su interior. La estructura austenítica dispersa divide el metal fundido de la zona afectada por el calor.

La Figura 4.67 muestra la frontera de fusión en el acero inoxidable austenítico AISI 304, en la parte superior de la frontera se observa una considerable cantidad de ferrita que incluso se extiende hacia la zona afectada por el calor. La Figura 4.68 muestra un acercamiento de la frontera de fusión donde se observa ferrita.



Figura 4.66: Frontera de fusión. Parte superior corresponde al acero Inox. 430. Atacado con ácido oxálico. Ampliación 50x.



Figura 4.67: Frontera de fusión cercana al acero inoxidable 304. La ferrita se extiende desde la zona de fusión hacia la ZAC. Atacado con ácido oxálico. Ampliación 50x.



Figura 4.68: Frontera de fusión cercana al acero inoxidable 304. Las líneas negras en desorden corresponden a ferrita, mientras que las zonas claras son austenita. Atacado electrofóticamente. Ampliación 200x.

Zona afectada por el calor

En la Figura 4.69 se muestra la ZAC del acero inoxidable ferrítico AISI 430. Los granos ferríticos han crecido y en el interior se encuentran precipitados de carburo, los bordes de grano están compuestos de martensita. La Figura 4.70 muestra en cambio la zona afectada por el calor para el acero inoxidable AISI 304, se observa que el grano no ha crecido. Además rodeando los granos se ven pequeñas cantidades de ferrita delta.

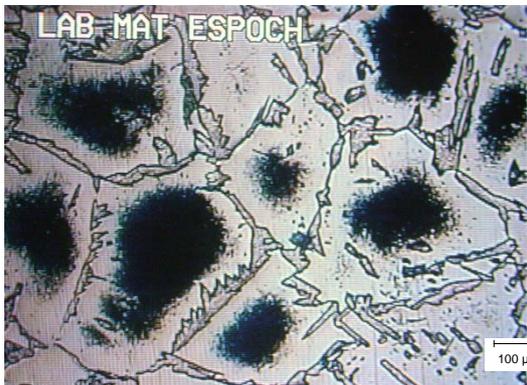


Figura 4.69: ZAC del acero inoxidable 430. Granos ferríticos con precipitados en su interior. Martensita rodea los bordes de grano. Atacado con ácido oxálico. Ampliación 50x.



Figura 4.70: ZAC del acero inoxidable 304. Los granos austeníticos están rodeados de ferrita delta y no han crecido. Atacado electrofóticamente. Ampliación 50x.

4.4 Perfiles de dureza

Debido a los cambios de microestructura significativos en distancias muy cortas para este tipo de soldaduras se ha realizado medidas de microdureza Vickers. La ecuación que permite obtener el dato de dureza Vickers es la siguiente:

$$VHN = \frac{1.72 P}{d^2} \quad (24)$$

Donde:

P: Carga aplicada, Kg

d: Distancia de la diagonal impresa, μm

Se aplicaron cargas de 0.1 y 0.2 Kg de tal manera que provocaron impresiones pequeñas que permitieron tomar datos de dureza cada 100 μm .

Dureza VHN en la soldadura: AISI 430-AISI 430

El acero inoxidable AISI 430 posee una dureza en condiciones iniciales (antes de soldar) de 163 VHN en el grano completamente ferrítico. La Figura 4.71 muestra la dureza Vickers versus distancia tomada desde el metal fundido hasta el metal base.

En la Figura 4.71 se observa que hay muchos cambios de dureza a lo largo de la sección transversal. Inicialmente en el metal fundido la microestructura existente está compuesta de ferrita (puntos más bajos) y martensita (puntos más altos).

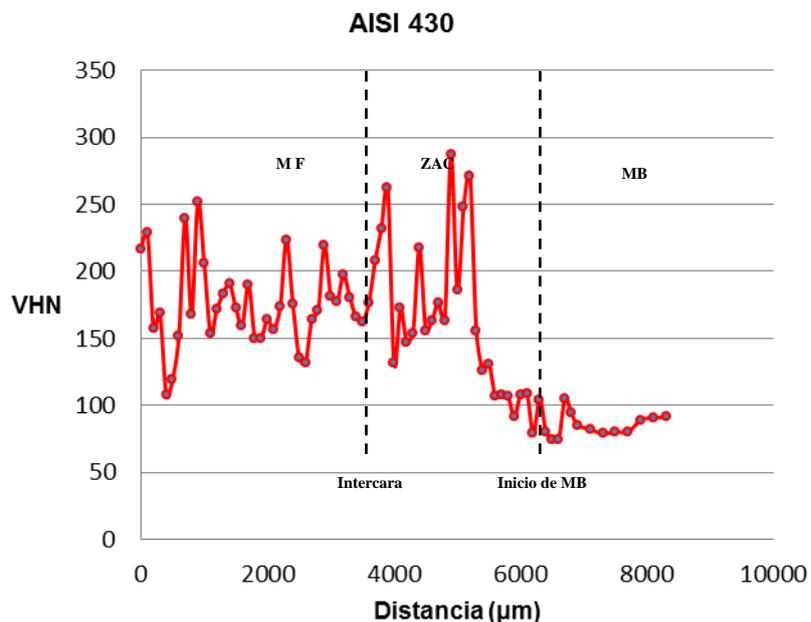


Figura 4.71: Microdureza VHN para el acero inoxidable AISI 430

La ZAC también posee picos correspondientes a martensita y precipitados formados también en esta zona. Los valores más bajos presentes en esta zona corresponden a ferrita.

Ya en el metal base la dureza ha disminuido considerablemente a valores correspondientes a una fase totalmente ferrítica.

Dureza VHN en la soldadura: AISI 304-AISI 304

El acero inoxidable AISI 304 posee una dureza en condiciones iniciales de 217 VHN. La Figura 4.72 muestra los cambios de dureza a lo largo de la sección transversal.

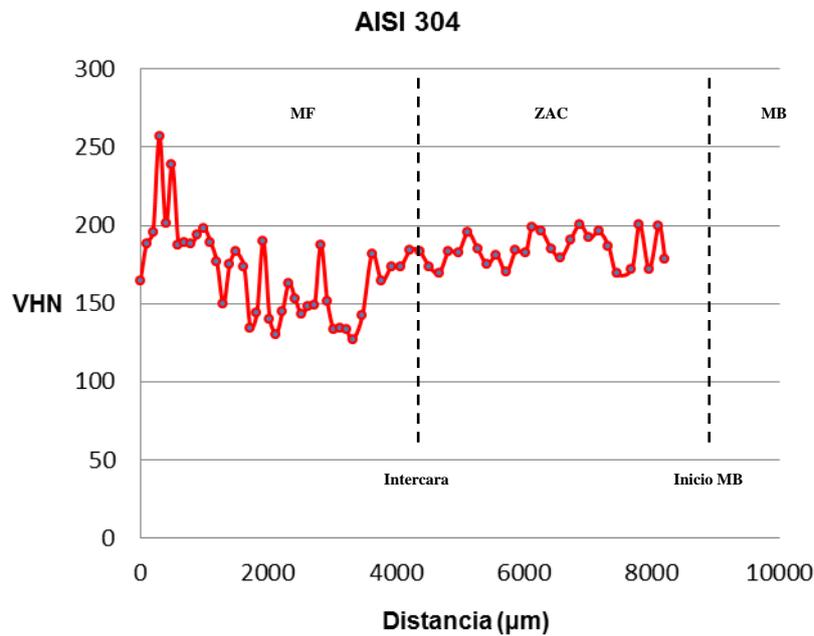


Figura 4.72: Microdureza VHN para el acero inoxidable AISI 304

En el metal fundido los picos muestran la dureza de la austenita, mientras que los valores más bajos corresponden a ferrita columnar y tipo placas distribuidas en esta zona. En la interfase y debido a la presencia de ferrita la dureza no es alta. Una vez atravesada esta interfase, la dureza muestra una cierta estabilización siendo los valores picos combinaciones de austenita, ferrita y carburos; mientras que los puntos bajos pertenecen a estructuras combinadas de austenita y ferrita.

Dureza VHN en la soldadura disímil: AISI 1008-AISI 304

La Figura 4.73 muestra los cambios de dureza a lo largo de la sección transversal para esta soldadura.

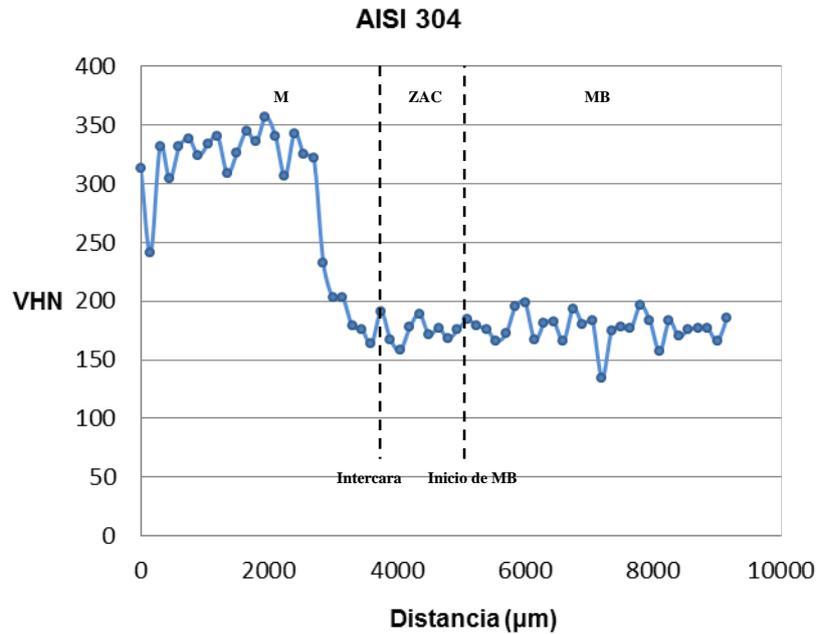


Figura 4.73: Microdureza VHN para el acero inoxidable AISI 304

En la Figura 4.73 se observa que en el metal fundido la dureza se encuentra entre valores similares llegando a un promedio de 325 VHN, en este sector la microestructura consta en su gran mayoría de austenita y pequeñas cantidades de ferrita. Tanto para la ZAC como para el metal base se aprecia que la dureza es prácticamente semejante. La razón por la que la dureza es mayor en el metal fundido (MF) que en la ZAC o en el Metal Base (MB) se debe a que en el proceso de solidificación la austenita fue enriquecida con elementos promotores de esta fase como el carbono lo que provoco el incremento en la dureza de esta zona.

La Figura 4.74 muestra las durezas en el acero con bajo contenido de carbono medidos desde el centro del pozo de soldadura. El metal fundido de este material conformado de austenita y ferrita posee valores similares de dureza que los del acero inoxidable austenítico. La ZAC muestra valores más estables de dureza pertenecientes a las fases ferrítica y perlítica, estos valores de dureza se mantienen dentro de un rango estable hasta el metal base.

En la Figura 4.75 se aprecia que esta combinación es una de las más similares para los diferentes sectores.

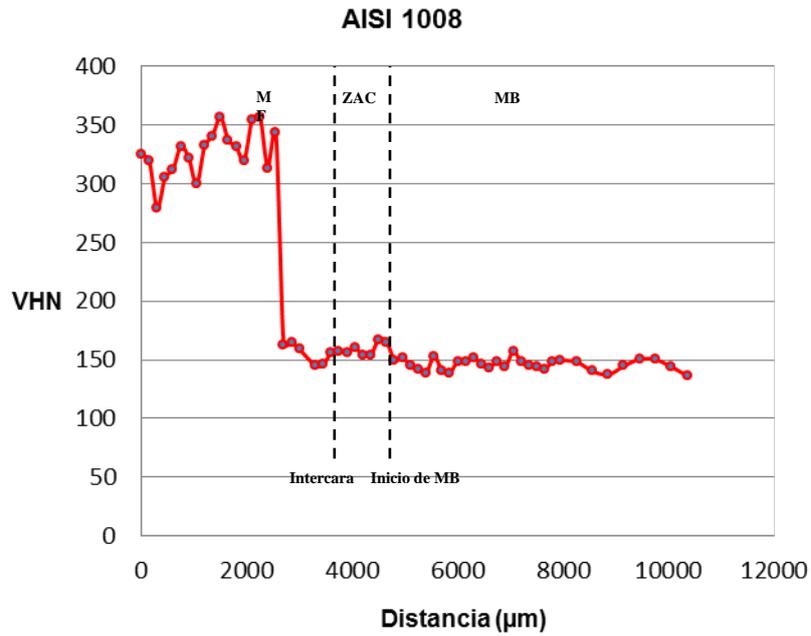


Figura 4.74: Microdureza VHN para el acero AISI 1008.

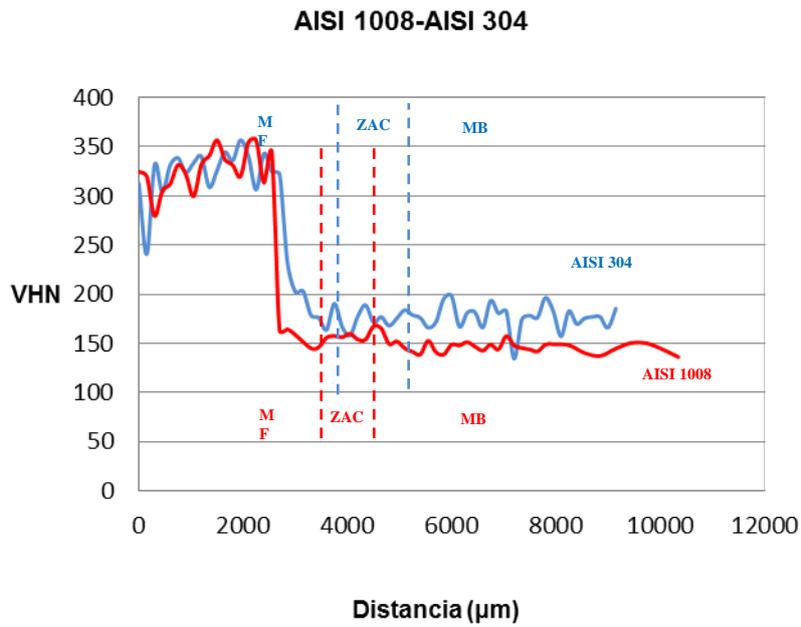


Figura 4.75: VHN vs. Distancia para la junta AISI 1008-AISI 304

Dureza VHN en la soldadura disímil: AISI 1008-AISI 430

La dureza que presenta el acero inoxidable AISI 430 a lo largo de la sección transversal se observa en la Figura 4.76.

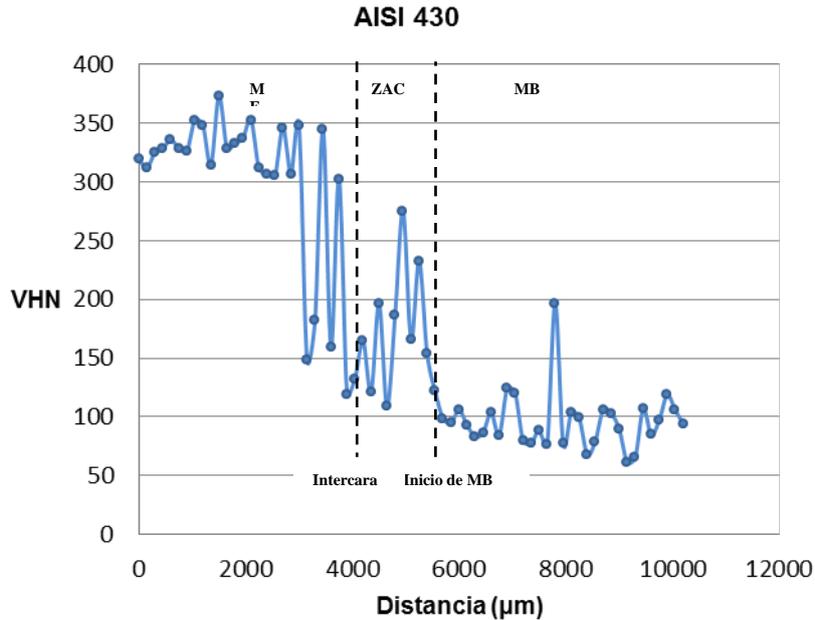


Figura 4.76: Microdureza VHN para el acero inoxidable AISI 430

La dureza en este material es muy variable. Para el metal fundido los valores de microdureza no varían significativamente, el valor promedio de dureza en este sector es de VHN 331; esta dureza corresponde a una microestructura compuesta de: austenita + 20 % de martensita + 5% de ferrita.

Luego al atravesar la intercara se tienen valores de dureza muy variables debido a la presencia de martensita, ferrita y carburos. Algunos valores pico en este sector corresponde a la dureza de la estructura martensítica, los valores más bajos le pertenecen a la ferrita. Ya en el metal base la presencia de carburos muy cercanos a la zona afectada por el calor poseen durezas altas, no así los granos ferríticos cuyas durezas corresponden a los valores más bajos.

La Figura 4.77 posee los datos de la dureza del acero AISI 1008. Se observa en la figura que al igual que en el metal fundido del acero inoxidable ferrítico hay variaciones de dureza para la estructura constituida de: austenita + 20% de martensita + 5 % de ferrita.

Antes de llegar a la zona afectada por el calor se observa un incremento de dureza probablemente debido a alguna migración de carbono desde el metal base hacia la zona de fusión. En la ZAC la dureza disminuye y se mantiene dentro de un rango corto hasta el metal base.

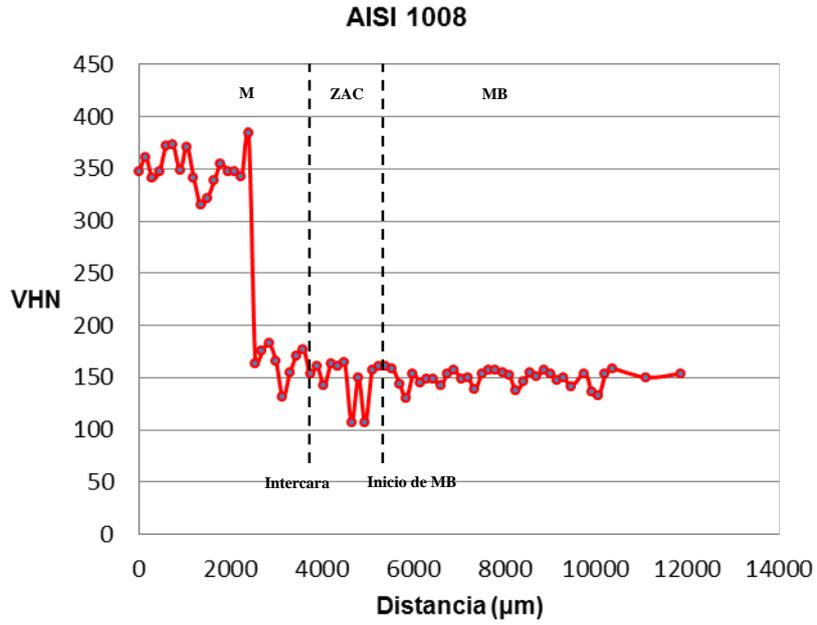


Figura 4.77: Microdureza VHN para el acero AISI 1008.

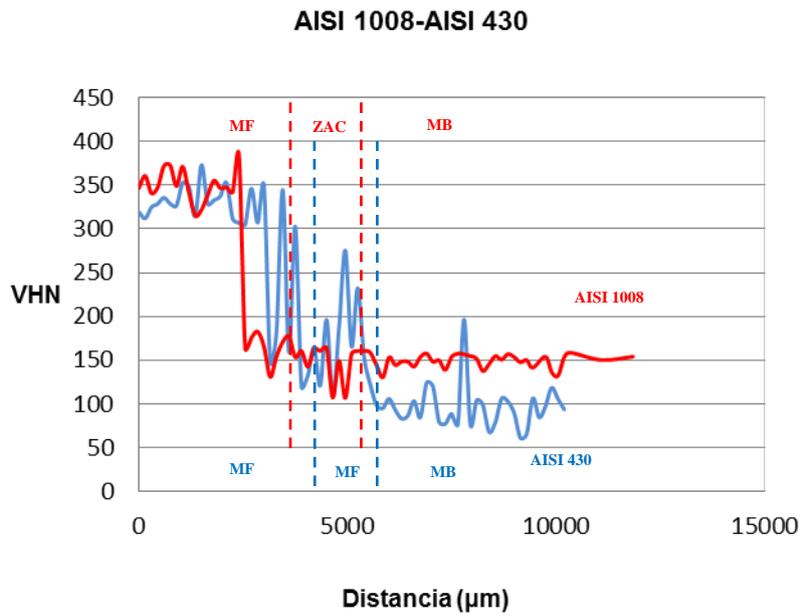


Figura 4.78: Dureza VHN vs. Distancia, para la junta AISI 1008-AISI 430

Para observar la variación de durezas entre los dos materiales, en la Figura 4.78 se ha sobrepuesto las graficas de las Figuras 4.76 y 4.77. La Figura 4.78 deja observar que en el metal fundido no hay gran diferencia entre los valores de dureza. No así en la ZAC donde el acero inoxidable ferrítico se ve más afectado que el acero de bajo contenido de carbono.

Dureza VHN en la soldadura disímil: AISI 430-AISI 304

El acero inoxidable AISI 304 posee una dureza de 206 VHN en condiciones iniciales (antes de soldar), mientras que el acero inoxidable AISI 430 tiene una dureza 163 VHN. En las Figuras 4.79 y 4.80 se muestran las variaciones de dureza desde el centro del metal fundido hacia los diferentes metales base.

En la Figura 4.79 se pueden observar los valores de dureza para el acero inoxidable austenítico. En el metal fundido la dureza es elevada. Esta zona está compuesta de: austenita + 11% de ferrita. Los valores más altos corresponden a la fase austenítica, mientras que los valores más bajos pertenecen a sectores compuestos de austenita y ferrita.

En la interfase se observa que la dureza decae debido a la acumulación de ferrita en la frontera de fusión. Atravesada la interfase, es decir en la ZAC, los valores de dureza pertenecen a granos austeníticos con ferrita en los límites de grano. Los pequeños picos en esta zona pertenecen a carburos.

En el metal base los valores de dureza pertenecen a fases compuestas de: austenita, ferrita δ y carburos. El valor de dureza promedio en este sector es de VHN 185.

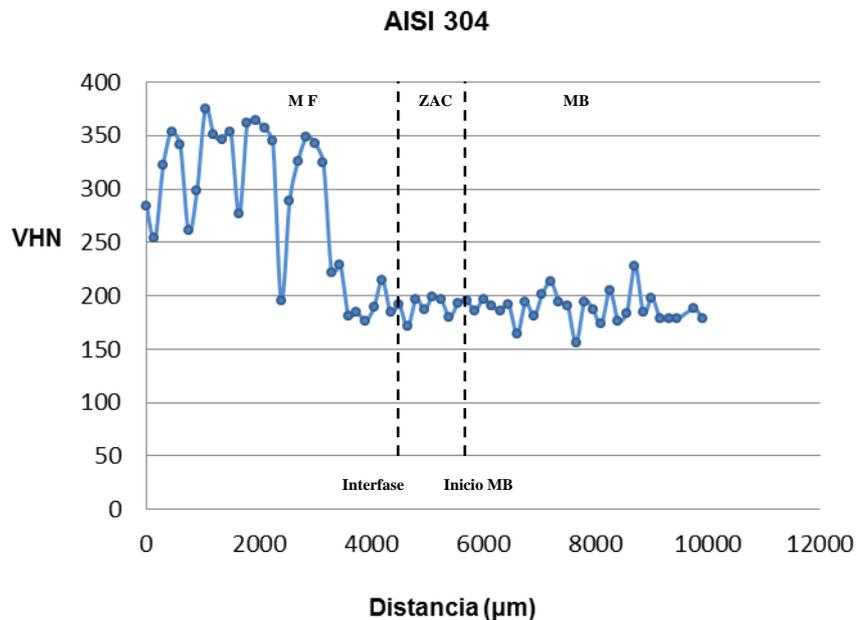


Figura 4.79: Microdureza VHN para el inoxidable AISI 304.

En la Figura 4.80 se muestra los valores de dureza del acero inoxidable ferrítico. De igual manera que en el acero inoxidable austenítico, el metal fundido está compuesto por las fases: austenita + 11% de ferrita. La frontera de fusión muestra valores picos probablemente debido a la estructura martensítica en los límites de grano ferrítico.

En la ZAC se observan valores pico que corresponden a las fases: martensita + ferrita. Los valores más bajos corresponden a la ferrita ubicada entre la martensita y los precipitados. En el metal base los valores de dureza se mantienen dentro de un rango estable y poseen un promedio de 125 VHN.

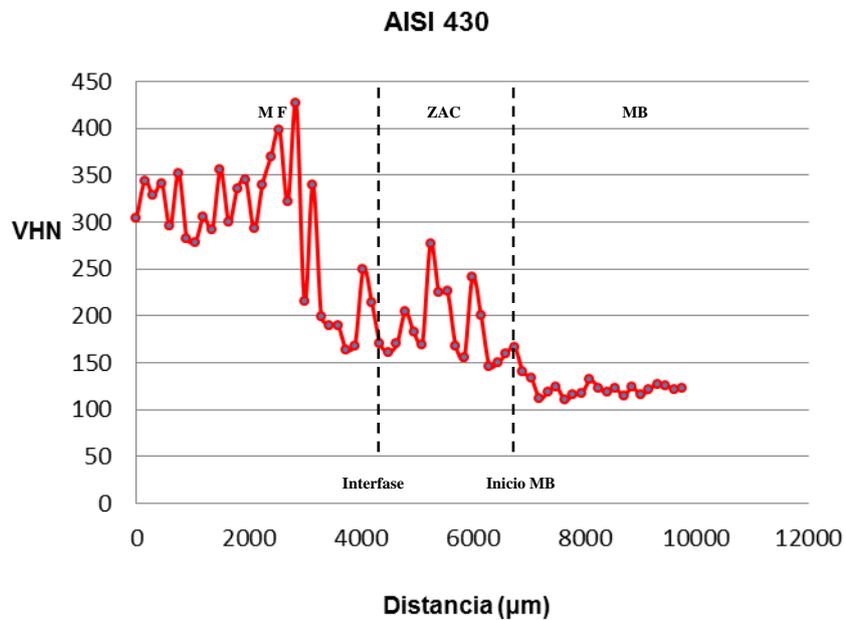


Figura 4.80: Microdureza VHN para el inoxidable AISI 430.

La Figura 4.81 muestra la diferencia entre los dos materiales. En el metal fundido existen tendencias similares, estas van cambiando conforme van avanzando hacia la frontera de fusión. La ZAC para el inoxidable ferrítico es mucho mas variable que la del acero inoxidable austenítico donde las durezas se mantienen dentro de un pequeño rango de valores. En el metal base la diferencia es considerable debido que los dos materiales poseen estructuras diferentes siendo la estructura austenítica la que posee mayor dureza.

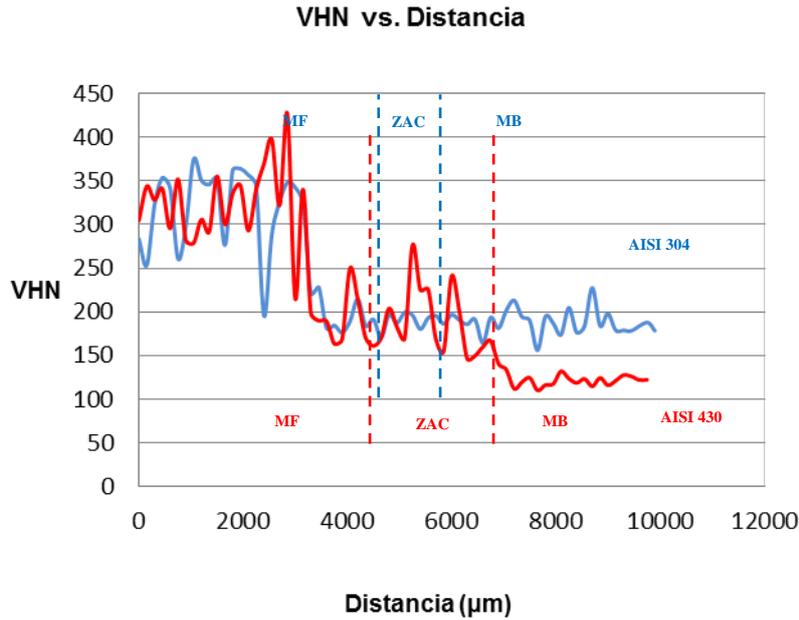


Figura 4.81: Dureza VHN vs. Distancia, para la junta AISI 430-AISI 304

4.5 Propiedades mecánicas de las soldaduras

La Figura 4.82 indica las dimensiones de las probetas para realizar ensayos de tensión y doblado en las soldaduras.

El ensayo de tracción tiene como objetivo hallar el límite de la fluencia y la resistencia última para las juntas. Para determinar el límite de fluencia se ha decidido utilizar el método de desplazamiento para un 0.2 % de deformación unitaria.

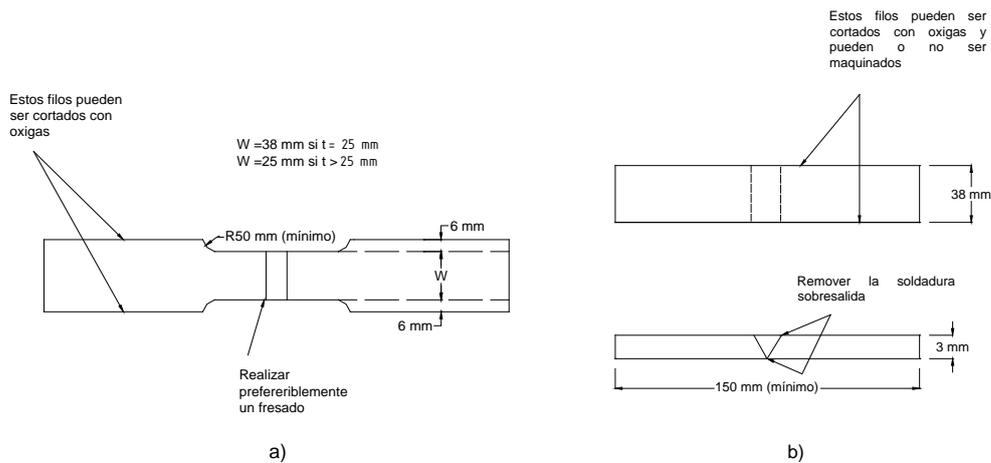


Figura 4.82: Especímenes a) Para tracción y b) para el doblado de cara y raíz.

Soldadura del acero inoxidable ferrítico AISI 430

- **Ensayo de tracción**

Diagrama Esfuerzo vs. Deformación unitaria:

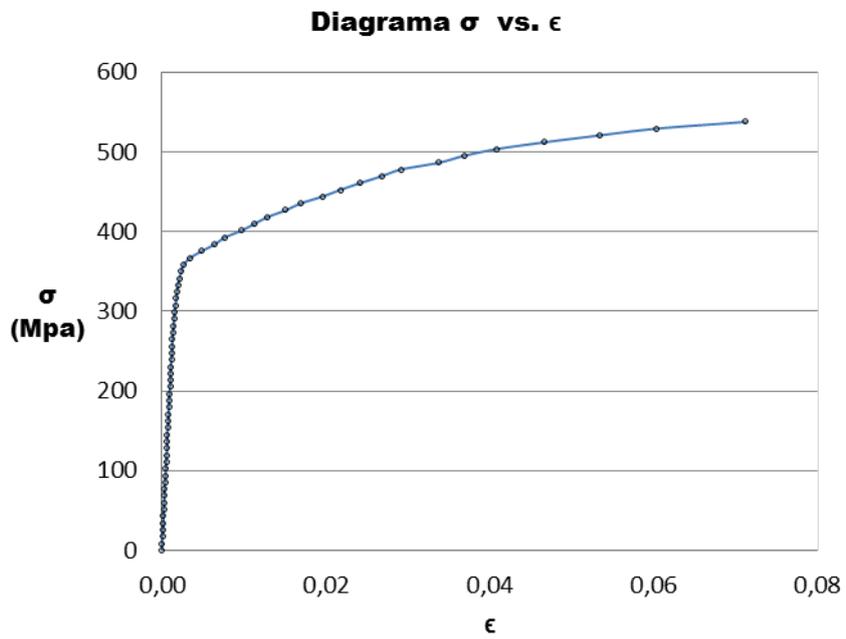


Figura 4.83: Diagrama Esfuerzo vs. Deformación para la junta AISI 430-AISI 430.

Propiedades mecánicas:

Tabla 4.9: Propiedades mecánicas de la junta AISI 430-AISI 430.

Probeta	Sy	Sut
	MPa	MPa
AISI 430- AISI 430	367.1	544.6

- Ensayos de doblado



Figura 4.84: Doblado de cara para la junta AISI 430-AISI 430



Figura 4.85: Doblado de raíz para la junta AISI 430-AISI 430

Soldadura del acero inoxidable austenítico AISI 304-AISI 304

- Ensayo de tracción

Diagrama Esfuerzo vs. Deformación unitaria:

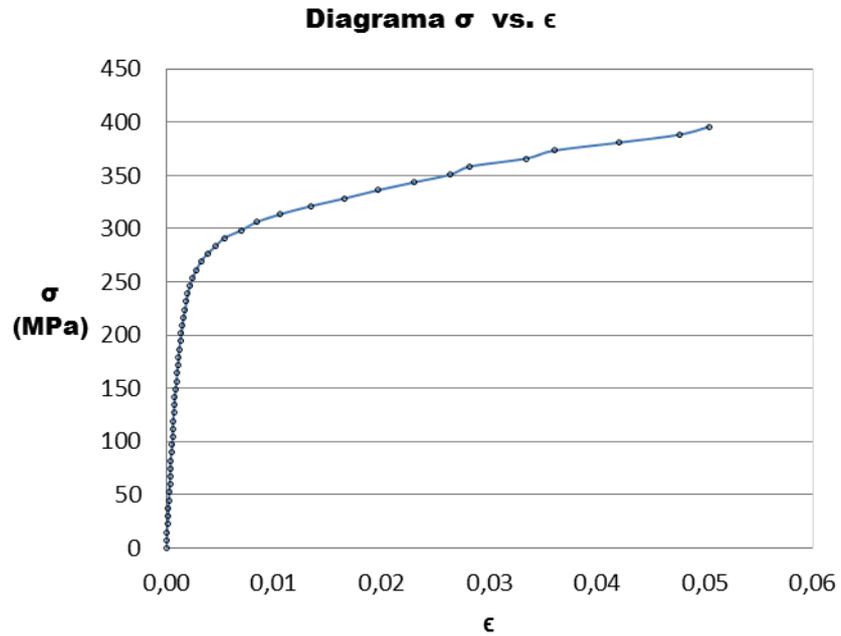


Figura 4.86: Diagrama Esfuerzo vs. Deformación para la junta AISI 304- AISI 304.

Propiedades mecánicas:

Tabla 4.10: Propiedades mecánicas de la junta AISI 304-AISI 304.

Probeta	Sy	Sut
	MPa	MPa

AISI 304- AISI 304	276.4	528.8
--------------------	-------	-------

- **Ensayos de doblado**



Figura 4.87: Doblado de cara para la junta AISI 304-AISI 304.



Figura 4.88: Doblado de raíz para la junta AISI 304-AISI 304.

Soldadura disímil: AISI 1008-AISI 304

- **Ensayo de tracción**

Propiedades mecánicas:

Tabla 4.11: Propiedades mecánicas de la junta AISI 1008-AISI 304.

Probeta	Sy	Sut
	MPa	MPa
AISI 1008- AISI 430	324.7	519.5

Diagrama Esfuerzo vs. Deformación unitaria:

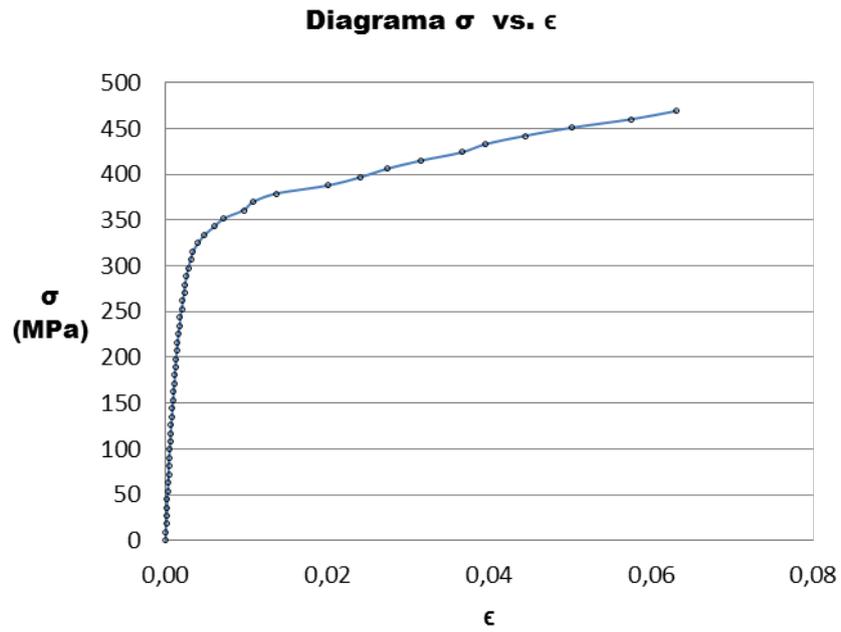


Figura 4.89: Diagrama Esfuerzo vs. Deformación para la junta AIS 1008-AISI 304.

- **Ensayos de doblado**



Figura 4.90: Doblado de cara para la junta AISI 1008-AISI 304.



Figura 4.91: Doblado de raíz para la junta AISI 1008-AISI 304.

Soldadura disímil: AISI 1008-AISI 430

- **Ensayo de tracción**

Diagrama Esfuerzo – Deformación unitaria:

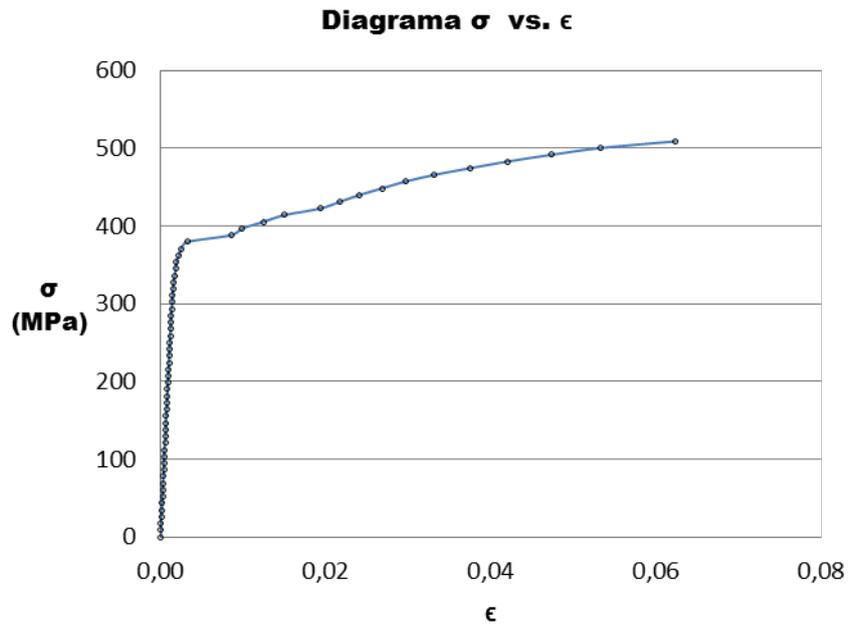


Figura 4.92: Diagrama Esfuerzo vs. Deformación para la junta AISI 1008-AISI 430.

Propiedades mecánicas:

Tabla 4.12: Propiedades mecánicas de la junta AISI 1008-AISI 430.

Probeta	Sy	Sut
	MPa	MPa
AISI 1008- AISI 430	379.7	521.2

- **Ensayos de doblado**



Figura 4.93: Doblado de cara para la junta AISI 1008-AISI 430.



Figura 4.94: Doblado de raíz para la junta AISI 1008-AISI 430.

Soldadura disímil: AISI 430-AISI 304

- **Ensayo de tracción**

Diagrama Esfuerzo vs. Deformación unitaria:

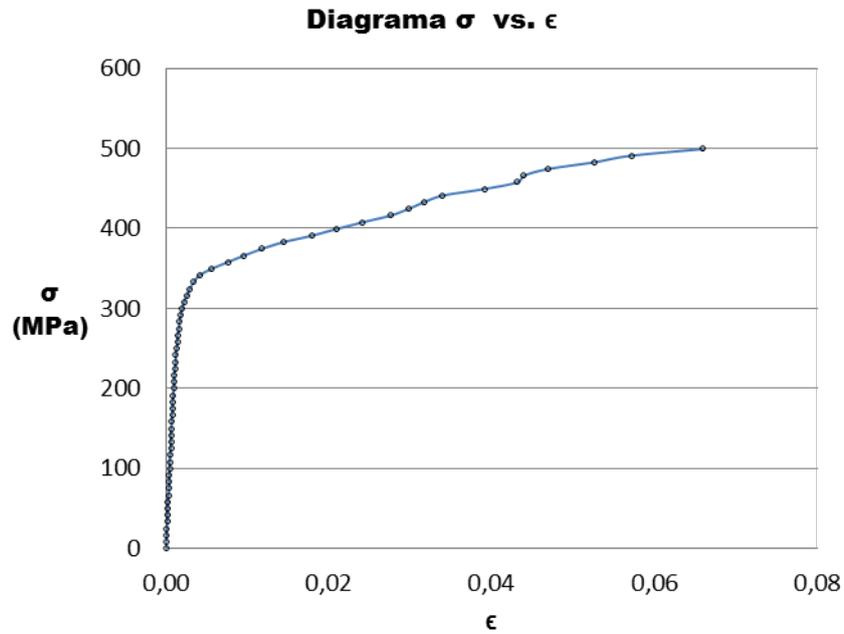


Figura 4.95: Diagrama Esfuerzo vs. Deformación para la junta AISI 430-AISI 304.

Propiedades mecánicas:

Tabla 4.13: Propiedades mecánicas de la junta AISI 430-AISI 304.

Probeta	Sy	Sut
	MPa	MPa
AISI 430- AISI 304	332.9	506.1

- **Ensayos de doblado**



Figura 4.96: Doblado de cara para la junta AISI 430-AISI 304.



Figura 4.97: Doblado de raíz para la junta AISI 430-AISI 304.

CAPÍTULO V

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

5.1 Análisis de las microestructuras

Las microestructuras observadas en el capítulo anterior muestran fases muy interesantes que varían dependiendo de la zona de la soldadura donde se encuentran. Estas microestructuras se analizan en este capítulo.

5.1.1 Soldadura del acero inoxidable ferrítico AISI 430

Zona de fusión

La secuencia que toma el acero inoxidable 430 en la zona de fusión indica que las fases presentes luego de la soldadura serán: ferrita + martensita.

La Figura 5.1 muestra la microestructura compuesta de ferrita, martensita y precipitados. El contenido de ferrita + precipitados es de aproximadamente 84%, mientras que el contenido de martensita es de 16%. Los carburos presentes en los granos ferríticos se formaron por la saturación de carbono en la fase ferrítica y están ubicados intragranularmente debido a la alta tasa de enfriamiento. Estos carburos no se formaron en los límites de grano debido a la alta solubilidad del carbono en la austenita.

La microestructura de la Figura 5.1 puede ser comparada con la Figura 5.2 obtenida de la referencia [8] en la que también se pueden observar las mismas fases.



Figura 5.1: Zona de fusión. Ferrita con bordes de grano martensítico. En el centro del grano las partes negras corresponden a precipitados. Atacado electrolíticamente. Ampliación 100x.

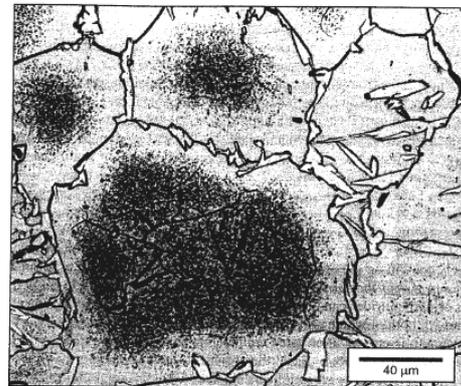


Figura 5.2: Microestructura del metal de soldadura tipo 430. Ferrita bifásica y martensita intragranular. [8]

Zona afectada por el calor

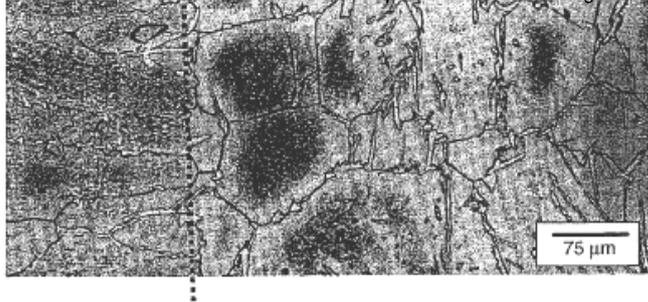
Tanto en la zona de fusión como en la ZAC, Figura 5.3, se puede observar el crecimiento de grano del orden de ASTM 2 a 3. La formación de austenita a elevadas temperaturas es la responsable de impedir que el grano continúe creciendo. La ZAC muestra la precipitación de carburos dentro del grano ferrítico pero en mayor cantidad debido probablemente a que en la ZAC la austenita no llega a disolver la misma cantidad de carbono que si lo logra en la zona de fusión.

La Figura 5.4 obtenida de la referencia [8] muestra la microestructura de un acero tipo 430 donde se observa la zona de fusión y la ZAC.



Figura 5.3: ZAC en la soldadura de un acero AISI 430. Se pueden observar los precipitados (color negro) dentro de los granos de ferrita. Atacado con ácido oxálico. Ampliación 25x.

Figura 5.4: Acero inoxidable tipo 430, microestructura de la ZAC. Note la presencia de martensita en los límites de grano y la alta precipitación intragranular. [8]



En la Figura 5.5 se observa un acercamiento de los precipitados dentro del grano ferrítico. Probable en esta zona haya una combinación de carburos y pequeñas cantidades de ferrita. Esta ferrita puede ser la causante de durezas comparadas con la estructura martensítica e incluso de valores más bajos.

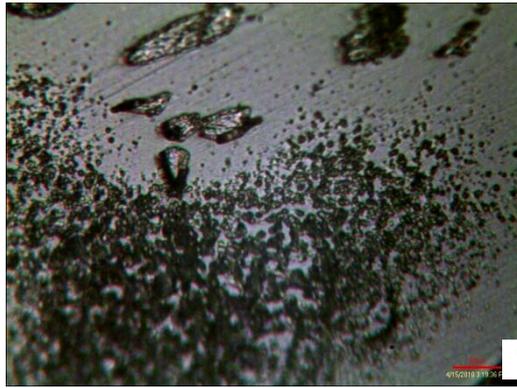


Figura 5.5: ZAC en la soldadura del acero Inox. AISI 430. Acercamiento en la zona de precipitados dentro del grano ferrítico. Ataque electrolítico. Ampliación 100x.

5.1.2 Soldadura del acero inoxidable austenítico AISI 304

Zona de fusión

Las Figuras 4.23 y 4.24 indicaron que la solidificación ocurrida fue de tipo FA (ferrita-austenita). Las morfologías presentes fueron una mezcla entre ferrita columnar y tipo placas. Esta morfología se debe probablemente a la combinación de la tasa de enfriamiento con la alta relación Cr equiv / Ni equiv (debido al material de aporte) ubicado dentro del rango FA de la Figura 2.9.

En la Figura 5.6 se puede observar la morfología columnar y tipo placas en la zona de fusión. La Figura 5.7 y 5.8 muestran por separado las morfologías columnar y tipo placas.



Figura 5.6: Zona de fusión. Tipo de solidificación FA. Mezcla de ferrita columnar y tipo placas. Ampliación 100x.

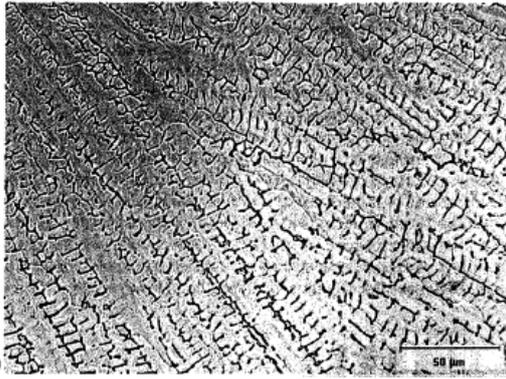


Figura 5.7: Zona de fusión. Tipo de solidificación FA. Mezcla de ferrita columnar y tipo placas.

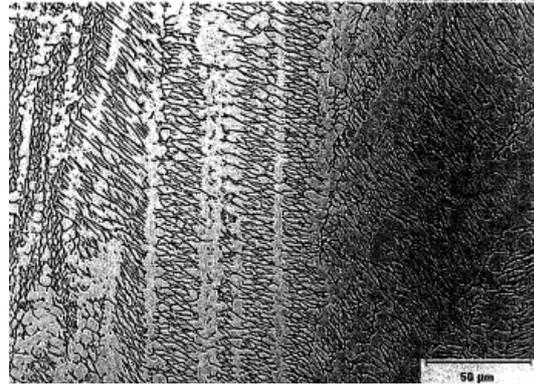


Figura 5.8: Zona de fusión. Tipo de solidificación FA. Mezcla de ferrita columnar y tipo placas.

Zona Afectada por el calor

La naturaleza de la ZAC en los aceros inoxidable austeníticos depende de la composición y microestructura del metal base.

- **Crecimiento de grano**

La Figura 5.10 muestra la ZAC para el acero inoxidable austenítico, esta no presenta crecimiento de grano comparada con la Figura 5.9. Se observa en la ZAC que la cantidad de ferrita delta ha disminuido. Esta disminución en la cantidad de ferrita delta probablemente se deba a disolución en austenita o a la formación de carburos.



Figura 5.9: Metal base del acero inoxidable AISI 304, Granos austeníticos, las líneas corresponden a ferrita delta. Atacado electrolíticamente. Ampliación 200x

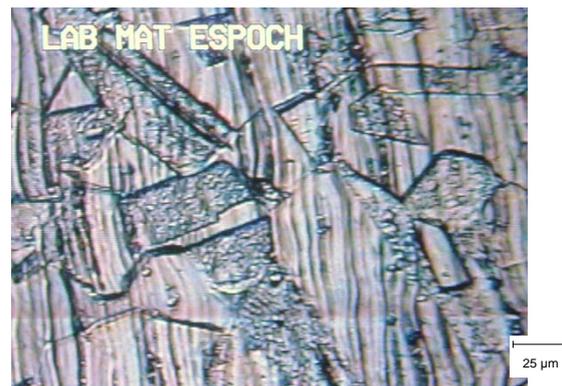


Figura 5.10: ZAC. Granos austeníticos. Las líneas corresponden a ferrita delta en menor cantidad que la que se observa en la Figura 5.9. Atacado electrolíticamente. Ampliación 200x

- **Formación de ferrita**

Debido a que el acero inoxidable AISI 304 se halla a la derecha del rango completamente austenítico, Figura 2.9, formará ferrita cuando se caliente a temperaturas bajo la línea de solidus. Una relación alta Cr equiv/Ni equiv formará más fácilmente ferrita.

Cuando la ferrita se forma lo hace usualmente a lo largo de las fronteras del grano como se muestra en la Figura 5.11 de la referencia [8]. En la Figura 5.12 se observa la formación de ferrita a lo largo de la frontera del grano austenítico que restringe el crecimiento del grano y minimiza la susceptibilidad a las fisuras.

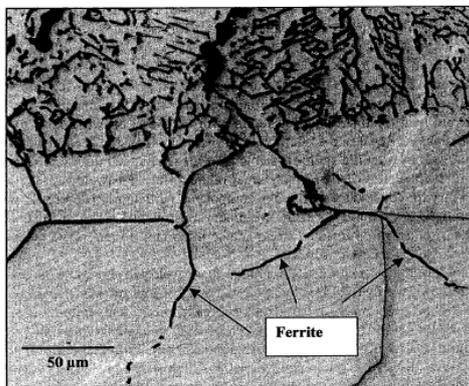


Figura 5.11: Ferrita a lo largo de las fronteras de grano de austenita en la ZAC de un acero inoxidable tipo 304L. [8]

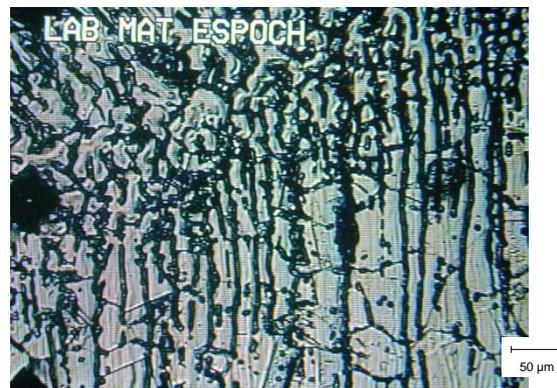


Figura 5.12: Formación de ferrita en la ZAC para la soldadura del acero inoxidable AISI 304. Ataque electrolítico. Ampliación 100x.

- **Precipitación**

Las flechas en la Figura 5.13 muestran ciertos sectores que probablemente sean precipitados. Con el calentamiento muchos de los precipitados presentes en el metal base pueden disolverse en austenita hasta llegar a la saturación de la matriz resultando en la formación de varios precipitados.

La precipitación en este material puede llegar a ser un problema debido a la gran cantidad de ferrita delta en el metal base. La complicación luego de la soldadura surge debido a que los precipitados formados no son muy apreciables metalográficamente y también porque la ferrita presente podría ser un problema si se lo mantiene a elevadas temperaturas que podrían acelerar la formación de precipitados como la fase sigma.



Figura 5.13: ZAC. En la estructura los pequeños puntos blancos y negros probablemente se tratan de carburos, nitruros o inclusiones. Ampliación 100x

5.1.3 Soldadura disímil AISI 1008-AISI 304

Zona de fusión

La Figura 5.14 se muestra que la solidificación en esta junta fue tipo AF (austenita-ferrita). La Figura 5.15 de la referencia [8] puede utilizarse para comparar la morfología. Esta solidificación se debe a los elementos promotores de ferrita en este caso del cromo y molibdeno presentes en el metal de aporte.



Figura 5.14: Zona de fusión. Solidificación tipo AF. Ferrita (color negro) en austenita. Ataque electrolítico. Ampliación 100x.

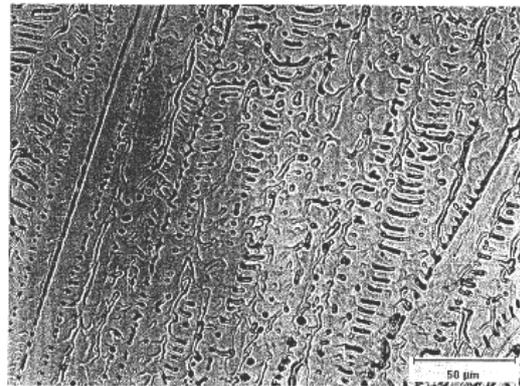


Figura 5.15: Microestructura resultado de una solidificación tipo AF. [8]

Un análisis más complejo de las morfologías de los aceros austeníticos, referencia [8], indica la preferencia de la solidificación tipo FA a la AF, ya que la solidificación tipo AF es más susceptible a las fisuras en la zona de fusión.

Región de transición en las fronteras de fusión

El acero AISI 1008 de la Figura 5.16 no presenta cambios en la frontera de fusión debido al bajo contenido de carbono que posee. Si existe algún tipo de migración de carbono desde la ZAC hacia la frontera de fusión esta será en muy pequeñas cantidades.

La frontera de fusión para el acero AISI 304 en la Figura 5.17 muestra la gran cantidad de ferrita que se extiende desde la zona de fusión hacia la ZAC.



Figura 5.16. Frontera de fusión. Atacado con nital. Ampliación 100x.



Figura 5.17: Frontera de fusión con gran cantidad de ferrita. Atacado con ácido oxálico. Ampliación 100x

Zona afectada por el calor

En la ZAC para el acero AISI 1008 en la Figura 5.18 se observa el crecimiento de grano y una mayor presencia de carburos en comparación con el metal base.

La ZAC para el acero AISI 304 en la Figura 5.19 no presenta el crecimiento de grano austenítico pero sí una considerable disminución de la cantidad de ferrita delta presente. En esta figura también se observan carburos probablemente debido a la saturación de la fase austenítica con los precipitados existentes en el metal base.



Figura 5.18: ZAC en el acero AISI 1008. Perlita media y carburos en una matriz ferrítica. Atacado con nital. Ampliación 100x.



Figura 5.19: ZAC de acero inoxidable AISI 304. Puntos color negro pertenecen a carburos o precipitados. Atacado con ácido oxálico. Ampliación 100x.

5.1.4 Soldadura disímil AISI 1008-AISI 430

Zona de fusión

La zona de fusión en la Figura 5.20 presenta granos austeníticos. La ferrita y martensita son muy difíciles de apreciar. Si el 20% de la martensita es simple es probable que se confunda con la fase austenítica formada a alta temperatura.

Esta microestructura muestra una gran variación comparada con la zona de fusión del acero inoxidable tipo 430, esto debido a la combinación del acero de bajo contenido de carbono y metal de aporte austenítico que han provocado la ausencia de bordes de grano martensíticos y precipitación de carburos intragranularmente.



Figura 5.20: Zona de fusión. Granos austeníticos. Atacado con ácido oxálico. Ampliación 100x

Región de transición en las fronteras de fusión

El acero AISI 1008, Figura 5.21, muestra una frontera de fusión sin cambios, al igual que se observó en la frontera de fusión de la soldadura disímil AISI 1008- AISI 304. El acero de bajo contenido de carbono ayuda a que no existan cambios notables en la frontera de fusión.

La frontera del acero AISI 430, Figura 5.22, muestra ferrita con bordes de grano martensíticos y precipitados ubicados intragranularmente. La figura deja ver claramente la variación de fases al pasar del metal fundido a la ZAC.



Figura 5.21: Frontera de fusión. Se puede observar una microestructura conformada por perlita en una matriz ferrítica. No se aprecian carburos en gran cantidad. Ampliación 100x

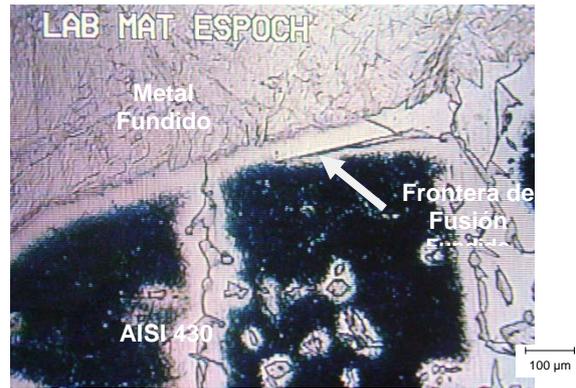


Figura 5.22: Frontera de fusión. Parte superior compuesta de austenita. Parte inferior correspondiente a la estructura del inoxidable 430 después de soldado. Ampliación 50x.

Zona afectada por el calor

Para las soldaduras disímiles donde el acero AISI 1008 es soldado con los aceros inoxidables austeníticos o ferríticos existe una gran similitud en las microestructuras de la frontera de fusión y de la ZAC; esto es en cierta manera obvio debido a que se han utilizado energías de soldadura similares, Tabla 5.16.

La ZAC del acero inoxidable ferrítico, Figura 5.24 muestra las microestructuras que se esperaban de este acero inoxidable y que se observaron en la soldadura AISI 430-AISI 430.



Figura 5.23: ZAC en el acero AISI 1008. Puede verse la presencia de perlita en una matriz ferrítica. Ampliación 100x



Figura 5.24: ZAC en el acero inoxidable AISI 430. Precipitación de carburos dentro del grano de ferrita, Ataque electroquímico. Ampliación 50x.

5.1.5 Soldadura disímil AISI 430-AISI 304

Zona de fusión

Esta zona muestra una microestructura totalmente diferente a las observadas anteriormente. La microestructura observada corresponde en su mayoría a austenita acompañada de cantidades de ferrita desordenada que no presenta una morfología conocida.



Figura 5.25: Zona de fusión. Las líneas negras en completo desorden son ferrita en una matriz austenítica. Ampliación 100x



Figura 5.26: Zona de fusión. Igual a la figura anterior pero con una ampliación mayor. Se observa claramente la ferrita. Ampliación 200x

Esta morfología es el resultado de la combinación del acero inoxidable ferrítico y austenítico, donde probablemente el metal aporte y el acero inoxidable AISI 304 llevan a la zona de fusión hacia una tendencia más austenítica que ferrítica, esto puede apreciarse en la Figura 5.26 donde el acercamiento revela la ferrita delta distribuida en una matriz austenítica. El desorden que muestra la ferrita delta puede deberse a la alta tasa de enfriamiento y al aumento de la relación Cr equiv / Ni equiv.

Según el diagrama de Schaeffler existe 11% de ferrita, incluso mucho mayor que la junta AISI 304-AISI 304 y AISI 1008-AISI 304. Este incremento en la cantidad de ferrita delta puede ser un problema ya que puede provocar la precipitación de carburos que reduciría su ductilidad.

Región de transición en las fronteras de fusión

Según el diagrama de Schaeffler existe la posibilidad de estructuras como: ferrita + austenita o austenita + martensita.

Para el acero inoxidable ferrítico AISI 430, en la frontera de fusión la estructura presente está compuesta de: austenita, martensita y ferrita como puede verse en la Figura 5.27.

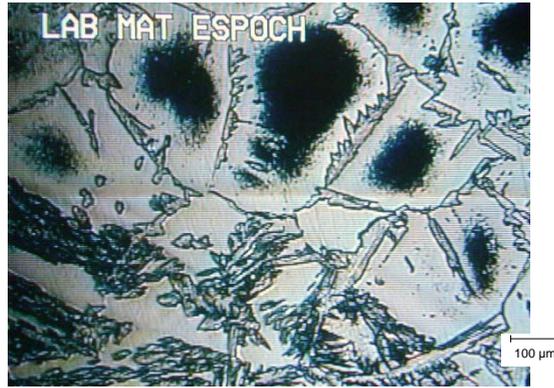


Figura 5.27: Frontera de fusión cercana al acero inoxidable 430. Ampliación 50x.

Para el acero inoxidable austenítico AISI 304, Figura 5.28, se observa que la frontera de fusión se compone de las fases ferríticas y austeníticas. Además la ferrita delta se extiende desde la zona de fusión hasta la ZAC de igual manera que ocurrió en la junta AISI 304-AISI 304.

La Figura 5.29 tiene un acercamiento de la frontera de fusión donde se observa la morfología que posee la ferrita delta en este sector.



Figura 5.28: Frontera de fusión cercana al acero inoxidable 304. Ampliación 50x.



Figura 5.29: Frontera de fusión cercana al acero inoxidable 304. Ampliación 200x.

Zona afectada por el calor

Las zonas afectadas por el calor de los aceros inoxidable: austenítico AISI 304 y ferrítico AISI 430 muestra las mismas características que se observaron en las juntas: AISI 304-AISI 304 y AISI 430-AISI 430 respectivamente.

5.2 Análisis de las propiedades mecánicas

Dentro de las propiedades mecánicas que se han analizado están: la dureza Vickers y la resistencia a la tracción. Estas propiedades permitirán luego correlacionarlas con la microestructura.

5.2.1 Soldadura del acero inoxidable ferrítico AISI 430

Dureza

La microdureza Vickers para esta soldadura es muy variable desde la zona de fusión hasta el metal base. Las fases presentes dependiendo de la zona en análisis pueden ser: martensita, carburos, ferrita + pequeñas cantidades de carburos, o solamente ferrita. En la zona de fusión y la ZAC existen valores de dureza variados como por ejemplo: 107, 160, 189, 205 VHN. Las diferencias entre los valores son considerablemente altas, por esta razón no se puede obtener un valor promedio que definan dichas zonas.

La Tabla 5.1 muestra algunos valores correspondientes a las fases presentes.

Tabla 5.1: Microdurezas VHN para diferentes zonas

Zona	Microestructura			
	Martensita	Ferrita	Ferrita+ Carburo	Carburo
Zona de fusión	199	168	171	-
ZAC	181	163	-	199
Metal base	-	104	-	-

Resistencia mecánica

La Tabla 5.2 muestra el límite de fluencia de la probeta y el porcentaje de elongación.

Tabla 5.2: Sy para la probeta AISI 430-AISI 430

Sy de la probeta (MPa)	AISI 430 Sy mínimo (MPa)	Elongación en 50mm %
367.1	205	13

El espécimen fallo en el material base. La falla observada fue del tipo cono-cráter correspondiente a materiales dúctiles.



Figura 5.30: Espécimen soldado y traccionado AISI 430-AISI 430. Cara



Figura 5.31: Espécimen soldado y traccionado AISI 430-AISI 430. Raíz

En el espécimen traccionado observado en la Figura 5.30 puede apreciarse la considerable deformación que sufrió la zona de fusión (aproximadamente 15 mm); además los ensayos de doblado tanto de cara como de raíz no presentaron fisura alguna. Esta junta ha probado poseer una buena ductilidad en la zona de fusión gracias a valores de ferrita α de 68 a 70 %.

5.2.2 Soldadura del acero inoxidable AISI 304

Dureza

La microdureza Vickers del acero inoxidable AISI 304 en la zona de fusión (formada de austenita + 6% ferrita) varía entre 130 a 257 VHN; aquí las durezas tienen un amplio rango de variación debido a que ciertos sectores contienen mayor o menor cantidad de ferrita delta (columnar o tipo placas).

La microdureza en la ZAC (austenita + ferrita delta + carburos) posee valores que fluctúan de 170 a 201 VHN, para este sector y debido a que el rango de variación es bajo comparado con el de la zona de fusión se ha decidido obtener un valor promedio de dureza equivalente a 180 VHN.

Resistencia mecánica

La Tabla 5.3 indica el valor del límite de fluencia de la probeta. El espécimen fallo en el metal fundido, el tipo de falla observado fue tipo cono-cráter.

Tabla 5.3: S_y para la probeta AISI 304-AISI 304

Sy de la probeta (MPa)	AISI 304 Sy mínimo (MPa)	Elongación en 50mm %
276.4	205	34

Según se aprecia en la Figura 5.32 la deformación en la cara fue de aproximadamente 15 mm, mientras que la Figura 5.33 indica una deformación aproximada de 10 mm. Los ensayos de doblado de cara y de raíz no presentaron fisuras o falla. La cantidad de ferrita (6%) presente en la junta probablemente otorgó una buena ductilidad a la zona de fusión.



Figura 5.32: Espécimen soldado y traccionado AISI 304-AISI 304. Cara



Figura 5.33: Espécimen soldado y traccionado AISI 304-AISI 304. Raíz

5.2.3 Soldadura disímil: AISI 1008-AISI 304

Dureza

Los valores promedio de dureza Vickers para el acero AISI 304 medidas en las diferentes zonas de soldadura se muestran en la Tabla 5.4. Los valores de microdureza registrados en este material se mantienen dentro de rangos pequeños debido a la estructura homogénea presente en cada una de sus zonas.

Tabla 5.4: Microdureza VHN para el AISI 304

Zona	Microestructura	
	Austenita	Austenita + Ferrita
Metal fundido	325	-
ZAC	-	180
Metal base	-	182

Para el acero AISI 1008 los valores de las microdurezas se pueden observar en la Tabla 5.5. La ZAC y el metal base del acero AISI 1008 poseen valores similares que fluctúan dentro de rangos muy pequeños.

Tabla 5.5: Microdureza VHN para el acero AISI 1008

Zona	Microestructura VHN	
	Austenita	Ferrita+ Perlita
Metal fundido	327	-
ZAC	-	144
Metal base	-	152

Resistencia mecánica

La fractura de esta probeta ocurrió en el acero AISI 1008, el tipo de falla observado fue del cono-cráter. El valor de la resistencia a la fluencia y la elongación se muestran en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6: Sy para la probeta AISI 1008-AISI 304

Sy de la probeta (MPa)	AISI 1008 Sy mínimo (MPa)	Elongación en 50mm %
324.7	180	24

La fractura ocurrió en el acero AISI 1008 por la mayor resistencia del pozo de soldadura y del acero inoxidable austenítico comparada con el acero de bajo contenido de carbono. Los ensayos de doblado de cara y raíz no mostraron fisuras o fallas demostrando una buena ductilidad en la junta.



Figura 5.34: Espécimen soldado y traccionado AISI 1008-AISI 304. Cara



Figura 5.35: Espécimen soldado y traccionado AISI 1008-AISI 304. Raíz

5.2.4 Soldadura disímil: AISI 1008-AISI 430

Dureza

La dureza Vickers para el acero inoxidable ferrítico se muestra en la Tabla 5.7. La dureza en la zona de fusión está compuesta de: austenita + 20% de martensita + 5% de ferrita. La ZAC posee variaciones de dureza dependiendo de la fase medida. En el metal base se ha obtenido un valor promedio de 114 VHN debido que se encuentran ubicados dentro de un rango pequeño de valores.

Tabla 5.7: Microdureza VHN del acero AISI 430

Zona	Microestructura		
	Austenita + Ferrita+ Martensita	Ferrita	Martensita
Metal fundido	331	-	-
ZAC	-	140	324
Metal base	-	114	-

La microdureza para el acero AISI 1008 se muestra en la Tabla 5.8. La dureza promedio en la ZAC es algo mayor que la del metal base debido a la mayor cantidad de perlita presente en la ZAC.

Tabla 5.8: Microdureza VHN para el acero AISI 1008

Zona	Microestructura VHN	
	Austenita + Ferrita + Martensita	Ferrita +Perlita
Metal fundido	349	-
ZAC	-	164
Metal base	-	149

Resistencia mecánica

La Tabla 5.9 muestra el límite de fluencia de esta junta. La fractura de esta probeta ocurrió en el acero AISI 1008, el tipo de fractura observado fue del tipo cono - cráter.

Tabla 5.9: Sy de la probeta AISI 1008-AISI 430

Sy de la probeta (MPa)	AISI 1008 Sy mínimo (MPa)	Elongación en 50mm %
379.7	180	4

La fractura del espécimen de tracción se observa en la Figura 5.36. Al igual que ocurrió en la junta AISI 1008-AISI 430, la fractura se presentó en el material más débil. Esto indica que el metal fundido, la ZAC del acero AISI 430 y la ZAC del acero AISI 1008 poseen una mayor resistencia mecánica que la del metal base del acero AISI 1008.

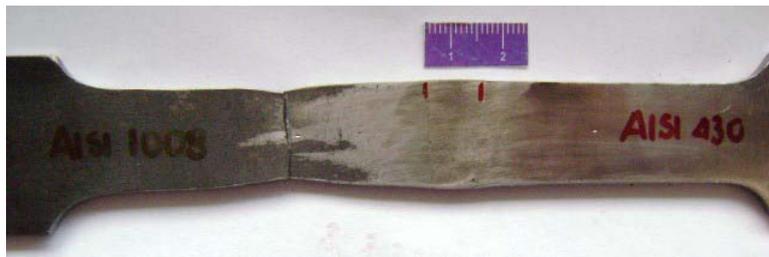


Figura 5.36: Espécimen soldado y traccionado AISI 1008-AISI 430. Cara



Figura 5.37: Espécimen soldado y traccionado AISI 1008-AISI 430. Raíz

5.2.5 Soldadura disímil: AISI 430-AISI 304

Dureza

El acero inoxidable ferrítico AISI 430 es el material que presenta el mayor rango de variación de dureza luego de la soldadura. En la Tabla 5.10 se muestran las fases presentes y

sus correspondientes durezas. La Tabla 5.11 muestra las microdurezas para el acero inoxidable austenítico.

Tabla 5.10: Microdureza VHN para el acero AISI 430

Zona	Microestructura			
	Austenita + Ferrita	Martensita	Ferrita	Carburo
Metal fundido	326	-	-	-
ZAC	-	183	161	200
Metal base	-	-	123	-

Tabla 5.11: Microdureza VHN para el acero AISI 304

Zona	Microestructura	
	Austenita + Ferrita	Austenita
Metal fundido	318	-
ZAC	-	191
Metal base	-	187

Resistencia mecánica

La Tabla 5.12 muestra el límite de fluencia y el porcentaje de elongación para la junta. El material se fracturó en el metal base del acero inoxidable ferrítico. En la Figura 5.38 se observa que el tipo de fractura fue cono-cráter. La falla en el acero inoxidable evidencia que el metal fundido, la ZAC del AISI 304 y la ZAC del AISI 430 poseen mayor resistencia que el metal base del acero inoxidable ferrítico AISI 430.

Tabla 5.12: Sy de la probeta AISI 430-AISI 304

Sy de la probeta (MPa)	AISI 430 Sy mínimo (MPa)	Elongación en 50mm %
332.9	205	15

Para esta junta los ensayos de doblado de cara y raíz no fracturaron indicando que la ductilidad de este acero es buena.



Figura 5.38: Especimen soldado y traccionado AISI 430-AISI 304. Raíz



Figura 5.39: Espécimen soldado y traccionado AISI 1008-AISI 304. Cara

5.3 Relaciones entre microestructura y propiedades

Las diferentes probetas soldadas de este trabajo poseen los límites de fluencia resumidos en la Tabla 5.13.

Un enfoque de los resultados más importantes obtenidos en las probetas de la investigación se indica en la Tabla 5.14. La tabla no contempla el análisis del acero AISI 1008 porque la evolución de este acero no fue tan importante como la de los inoxidables AISI 304 y AISI 430.

En la Tabla 5.15 se complementa la información de la Tabla 5.14 con las características de los ensayos de doblados.

Tabla 5.13: Sy de las diferentes probetas.

Material	Sy (Mpa)	
	AISI 430	AISI 304
AISI 430	367.1	-
AISI 304	332.9	276.4
AISI 1008	379.7	324.7

Tabla 5.14: Resumen y características importantes de las probetas.

Junta		Microestructura			Propiedades mecánicas	Observaciones
		Metal fundido	ZAC	Metal Base		
AISI 1008	AISI 430	Austenita+20%martensita+5% ferrita.	Ferrita con bordes de granos martensíticos y carburos en su interior.	Ferrita + carburos en el AISI 430 y ferrita + perlita en el AISI 1008.	S y = 379.7 MPa. Dureza Vickers muy variables dependiendo la fase.	Fractura del ensayo de tracción fue en el AISI 1008.
	AISI 304	Solidificación tipo AF.	No hay crecimiento de grano, presencia de carburos y	Ferrita delta en una matriz austenítica.		

			disminución de ferrita delta.		estables en la ZAC y el metal base.	AISI 1008.
AISI 304	AISI 430	Austenita+11% ferrita.	Ferrita con bordes de granos martensíticos y carburos en su interior.	Ferrita + carburos en el AISI 430 y ferrita + perlita en el AISI 1008.	S y = 332.9 MPa. Dureza Vickers muy variables en el metal fundido y en la ZAC.	Buena ductilidad mostrada en los ensayos de doblado.
	AISI 304	Solidificación FA. Morfología de ferrita columnar y tipo placas.	No hay crecimiento de grano austenítico. Disminución de la ferrita delta en los granos.	Posee cantidades razonables de ferrita delta.	S y = 276.4 MPa. Dureza Vickers variables dependiendo de la cantidad de ferrita.	Fractura del ensayo de tracción en el metal fundido.
AISI 430	AISI 430	Según Schaeffler austenita + 18 % de ferrita. Según Balmforth 68 a 70 % de ferrita +30 a 32 % de martensita.	Ferrita con bordes de granos martensíticos y carburos en su interior.	Granos ferríticos con presencia de carburos.	S y = 367.1 MPa. Dureza Vickers variables dependiendo de la fase presente.	Alta ductilidad en la zona de fusión.

Es muy importante no descartar ciertos fenómenos [8] como:

- El debilitamiento a temperatura intermedia (de 600 a 900 °C) en el acero inoxidable austenítico por la formación de la fase sigma; y
- El debilitamiento a elevada temperatura en el acero inoxidable ferrítico por crecimiento de grano y la formación de carburos.

Los dos ítems anteriores pueden conducir a posibles fallas en la soldadura cuando se realicen los ensayos mecánicos y no precisamente porque la junta no fue soldada adecuadamente sino debido a la aparición de estos fenómenos que disminuyen la ductilidad y la resistencia de las soldaduras.

Tabla 5.15: Características de los ensayos de doblado.

Junta		Zona de Fusión % ferrita	Ductilidad	Observaciones
AISI 1008	AISI 430	5% ferrita	Buena	Buena deformación en la zona de fusión
	AISI 304	0% ferritas según Schaeffler	Mínima	La ductilidad en la zona de fusión es mínima, en el doblado los elementos que se deformaron fueron los del metales base.
AISI 304	AISI 430	11%ferrita	Buena	El crecimiento de grano, la martensita y la precipitación de carburos en la ZAC, no afectaron los ensayos de

				doblado.
	AISI 304	6 % ferrita	Buena	Los ensayos de doblado muestran ciertas marcas (no fisuras) en ZF
AISI 430	AISI 430	18 % de ferrita	Buena	El crecimiento de grano, el 28% de martensita y la precipitación de carburos en la ZAC, no afectaron los ensayos de doblado.

5.4 Discusión de resultados

Las relaciones entre la microestructura y propiedades descritas para las soldaduras realizadas responden a las energías de aporte que se indican en la Tabla 5.16.

Tabla 5.16: Energías de soldadura, basados en los anexos 1 a 6.

Soldadura	Energía (J/mm)
AISI 430	420
AISI 304	406
AISI 1008-AISI 304	406
AISI 1008-AISI 430	420
AISI 430- AISI 304	420

Las microestructuras y propiedades mecánicas han demostrado poseer características aceptables para el proceso de soldadura GTAW semiautomático con los parámetros de soldadura indicados del Anexo 1 al 6.

Adicionalmente se cree que los ensayos mecánicos realizados también se beneficiaron por:

- La semiautomatización del proceso GTAW que permitió controlar la velocidad de soldadura y la longitud del arco; y
- Por los pequeños porcentajes de ferrita delta presente en la mayoría de soldaduras gracias al material de aporte seleccionado.

La soldadura de aceros inoxidables ferríticos y austeníticos conlleva una serie de cambios microestructurales directamente relacionados con las propiedades mecánicas. Los conocimientos aportados ayudan a comprender la evolución de estos materiales después de soldados.

La mayoría de las industrias desconoce por ejemplo:

- El debilitamiento de los aceros inoxidables a temperaturas intermedias o altas temperaturas.
- La precipitación de carburos con el incremento de temperatura.
- La influencia de la formación de carburos en la resistencia a la corrosión.
- La posible migración de carbono desde el material base hacia la zona de fusión y la ZAC.
- La selección del material base adecuado para una aplicación especial, etc.

Todos los ítems antes mencionados y otros más casi siempre no son considerados para la construcción de equipos muchos de ellos utilizados en la industria alimenticia, ambientes corrosivos o en otros casos para desempeñarse a elevadas o bajas temperaturas. Faltando de esta manera con la ingeniería y las prácticas que permiten cumplir las especificaciones y requerimientos necesarios.

Sin duda las soldaduras disímiles en muchos casos pueden disminuir los costos de ciertas aplicaciones siempre y cuando se apliquen con un adecuado proceso de soldadura, un procedimiento eficiente y la selección del mejor material dependiendo de la aplicación de la junta.

CAPÍTULO VI

6.1 CONCLUSIONES

- La relación entre la microestructura y las propiedades bajo el proceso GTAW semiautomático ha demostrado poseer buenas características para las soldaduras similares y disímiles entre los aceros AISI 1008, AISI 304 y AISI 430.
- Las microestructuras obtenidas han permitido observar y analizar los importantes cambios a los que están sujetos los aceros inoxidables AISI 304 , AISI 430 y de bajo contenido de carbono AISI 1008 al ser sometidos al proceso de soldadura GTAW semiautomático.
- El proceso GTAW semiautomático permitió obtener soldaduras visualmente aceptables y uniformes que influyeron en los buenos resultados finales.
- El dispositivo de traslación lineal ha permitido controlar parámetros influyentes de la soldadura como la longitud de arco y la velocidad de avance. La combinación de dos diferentes ramas de la Ingeniería ha permitido optimizar los resultados en este proceso.
- El acero inoxidable ferrítico AISI 430 está sometido a cambios drásticos en la zona de fusión y en la zona afectada por el calor durante la exposición a elevadas temperaturas. Mostrando cambios como: el crecimiento de grano y variación de la composición por la precipitación de carburos.
- El acero inoxidable austenítico AISI 304 evoluciona y posee algunos tipos de microestructuras resultantes en la zona de fusión dependiendo del material de aporte seleccionado y de la tasa de enfriamiento.
- El tipo de solidificación en el acero inoxidable austenítico AISI 304 tiene gran influencia en las propiedades mecánicas de la junta.
- El acero de bajo contenido de carbono AISI 1008 no ha demostrado cambios microestructurales significativos con relación a los mostrados por los aceros inoxidables AISI 430 y AISI 304. Siendo este un material favorable para las soldaduras disímiles de esta investigación.
- La presencia de porcentajes bajos de ferrita después de la soldadura de aceros inoxidables ayuda a mejorar las propiedades mecánicas.

- La selección del material de aporte adecuado es muy importante en la soldadura de materiales similares y disímiles. De su adecuada selección depende mucho la microestructura resultante.

6.2 RECOMENDACIONES

- Para automatizar cualquier proceso de soldadura es recomendable adquirir la mayoría de conocimientos que permitan realizar los ajustes necesarios para obtener los mejores resultados.
- Se recomienda realizar una investigación de la resistencia a la corrosión en las juntas de los aceros inoxidable AISI 304, AISI 430 y AISI 304 – AISI 430, este podría ser un aporte muy importante en la soldadura de materiales disímiles.
- Se recomienda la soldadura del acero inoxidable ferrítico AISI 430 donde la resistencia mecánica no sea requerimiento muy importante. Aplicaciones decorativas o semejantes podrían justificar técnicamente la soldadura de este acero inoxidable.
- La soldadura del acero inoxidable austenítico AISI 304 es más recomendable que la del acero ferrítico. Se justifica su utilización en la industria por mostrar cambios microestructurales que contribuyeron con sus buenas propiedades mecánicas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] TESIS SANCHEZ-CHAMORRO. Sistema computarizado de procedimientos de calificación de soldadura según normas ASME SECCIÓN IX, API 1104, AWS D 1.1, ASTM A 514 Y 1557. Riobamba: ESPOCH, 2000. pp. 44-48
- [2] TESIS ROJAS – TOTOY. Diseño y desarrollo de un software para selección de electrodos para aceros al carbono, aceros inoxidable, aluminio y hierro fundido. Riobamba: ESPOCH, 2002. p. 88
- [3] TESIS ARMAS – PEÑAFIEL. Influencia del gas protector en el proceso de soldadura GMAW de aceros estructurales AISI 1008 y AISI 1045. Riobamba: ESPOCH, 2003. pp. 103-111
- [4] BARNHOUSE E.J. & LIPPOLD J.C. Microestructure/ Property relationships in dissimilar welds between duplex stainless steels and carbon steels. USA: Editorial AWS Welding Research Supplement, 1998. pp. 87-225
- [5] CALLISTER, William D. Fundamental of materials science and engineering. USA: John Wiley & Sons Inc, 2001, p. 449
- [6] ASM HANDBOOK COMMITTEE. Atlas of Microstructures of Industrial Alloys. 8th. ed. EE.UU. pp. 3-10
- [7] INCHAURZA, Adrian. Aceros inoxidable y aceros resistentes al calor. México: Editorial LIMUSA, 1981. pp. 45-49, 104-113
- [8] LIPPOLD John & KOTECKI Damian. Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steel. EE.UU: John Wiley & Sons Inc, 2005. pp. 8-19
- [9] AWS C5.5 & AMERICAN NATIONAL STANDARD. Recommend practices for gas tungsten arc welding. EE.UU: Editorial AWS Welding Research, 2003. pp. 9-18
- [10] AGA Inc. Manual de soldadura manual para el Proceso Gas Tungsten Arc Welding. USA: 1990. pp. 11-18
- [11] SHIGLEY, Joseph Edward. Diseño en Ingeniería Mecánica. 3ra. ed. México: McGraw –Hill, 1979. pp. 277-286, 526
- [12] KEYSER. Materials Science in Engineering. 3th.ed. USA: Charles Merrill Publishing Co, 1980. pp. 224-225
- [13] AWS D1.1 & ANSI. Structural Welding Code-Steel. USA: Editorial AWS Welding Research, 1998. pp 101-118
- [14] GRAY, George. Atlas of Time-Temperature diagrams. USA: ASM, 1977. p. 531

[15] VIÑÁN, Aníbal. Mecánica de Sólidos II. Ecuador: Editorial ESPOCH, 1997. p. 101

[16] PÁSTOR, Mario R. Introducción a la Metalurgia de la Soldadura. Ecuador: Editorial ESPOCH, 2002. p.56

BIBLIOGRAFÍA

- AGA Inc. Manual de soldadura por el Proceso Gas Tungsten Arc Welding. USA: 1990.
- ASM HANDBOOK COMMITTEE. Atlas of Microstructures of Industrial Alloys. 8th. ed. EE.UU.
- AVNER Sidney H. Introducción a la metalurgia física. 2da. ed. México: McGraw –Hill, 1979.
- AWS C5.5 & AMERICAN NATIONAL STANDARD. Recommend practices for gas tungsten arc welding. EE.UU: Editorial AWS Welding Research, 2003.
- AWS D1.1& ANSI. Structural Welding Code-Steel. USA: Editorial AWS Welding Research, 1998.
- BARNHOUSE E.J. & LIPPOLD J.C. Microestructure/ Property relationships in dissimilar welds between duplex stainless steels and carbon steels. USA: Editorial AWS Welding Research Supplement, 1998.
- CALLISTER, William D. Fundamental of materials science and engineering. USA: John Wiley & Sons Inc, 2001.
- CEKIT. Circuitos Análogos y Electrónica Aplicada. Ecuador: Editorial Alfaomega, 2000.
- GRAY, George. Atlas of Time-Temperature diagrams. USA: ASM, 1977.
- HAMROCK Bernard, JACOBSON B., SCHMID Steven. Fundamentos de Elementos de Máquinas. 1ra. ed. México: McGraw –Hill, 1999.
- HORMWITZ Henry. Soldadura Aplicaciones y Práctica. México: Editorial Alfaomega, 1990.
- INCHAURZA, Adrian. Aceros inoxidables y aceros resistentes al calor. México: Editorial LIMUSA, 1981.
- KEYSER. Materials Science in Engineering. 3th.ed. USA: Charles Merrill Publishing Co, 1980.
- LINCOH ELECTRIC COMPANY. The Procedure Handbook of Arc Welding. Twelfth Edition. USA: Editorial Lincoln Electric, 1973.
- LIPPOLD John &.KOTECKI Damian. Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steel. EE.UU: John Wiley & Sons Inc, 2005.
- O´BRIEN R.L. Welding Handbook. 8th. ed. USA: 1998.

PALACIOS, REMIRO, LÓPEZ. Microcontrolador PIC 16F84 y Desarrollo de proyectos. 2da. ed. Ecuador: Editorial Alfaomega, 2003.

PÁSTOR, Mario R. Introducción a la Metalurgia de la Soldadura. Ecuador: Ed. ESPOCH, 2002.

SHIGLEY, Joseph Edward. Diseño en Ingeniería Mecánica. 3ra. ed. México: McGraw – Hill, 1979.

VIÑÁN, Aníbal. Mecánica de Sólidos II. Ecuador: Editorial ESPOCH, 1997.