

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESTUDIO DE SOLDABILIDAD DE ACEROS INOXIDABLES Y ACEROS AL CARBONO MEDIANTE EL PROCESO GTAW SIN MATERIAL DE APORTE

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

MARÍA DEL CISNE CEVALLOS GUERRERO

cisne8_15@hotmail.com

MARCO VINICIO CISNEROS MARTÍNEZ

marquitoc_08@hotmail.com

DIRECTOR: ING. DIEGO ESPINOSA

espinosadie@gmail.com

Quito, Enero 2013

DECLARACIÓN

Nosotros, María del Cisne Cevallos Guerrero, y Marco Vinicio Cisneros Martínez, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación personal; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, de acuerdo a lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la Normatividad Institucional Vigente.

María del Cisne Cevallos Guerrero

Marco Vinicio Cisneros Martínez

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por los señores María del Cisne Cevallos Guerrero, y Marco Vinicio Cisneros Martínez, bajo mi supervisión.

ING. DIEGO ESPINOSA
DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

A nuestras familias, por ser el principal soporte de este proyecto, gracias por el apoyo incondicional, la paciencia que tuvieron hacia nosotros cuando las cosas no salían de la mejor manera, por hacer hasta lo imposible para que nuestras metas se lleguen a cumplir, y por su comprensión cuando se empiezan a tomar grandes decisiones en la vida.

A nuestro grupo de amigos, quienes nos supieron compartir sus alegrías, tristezas, enojos, los cuales llegaron a formar parte de nuestras vidas al compartir muchos años en las aulas, en los momentos de diversión.

Agradecemos al personal de la Facultad de Ingeniería Mecánica, a los ingenieros Gabriel Velasteguí, Patricio Estupiñan, Rene Jame, quienes nos ayudaron con sus conocimientos y a todos los ayudantes, auxiliares de los laboratorios en donde se realizaron todos los ensayos que forman parte de este proyecto.

A la persona que supo guiar el desarrollo del proyecto, el Ing. Diego Espinosa, por todas las veces que tuvo el agrado de compartirnos su conocimiento y experiencia.

María del Cisne Cevallos; Marco Cisneros

DEDICATORIA

De manera especial a mi madre que ha sido esa luz guía, ese ejemplo de fortaleza, quien con su confianza, cariño y dedicación ha sido un apoyo incondicional y una gran amiga.

A mi abuelita quien fue gran compañía, guía y supo llenar de amor mi vida, sé que desde donde esté seguirá velando mi camino.

A mi padre que sé que es mi ángel guardián desde el momento de su partida.

Para toda mi familia por su apoyo y cariño gracias por haber formado parte de esta etapa tan importante.

A los amigos por haber compartido en este tiempo las alegrías, tristezas y triunfos.

María del Cisne Cevallos

Este proyecto lo dedico en primer lugar a la persona que desde que nació ha llenado de felicidad mi vida, que ha podido compartir conmigo grandes alegrías, tristezas, triunfos y me ha sabido apoyar en los momentos no tan gratos de mi vida, a mi gran amigo y único hermano Juan.

A toda mi familia, quienes de una manera u otra forman parte de este proyecto, y en especial a dos personas que físicamente ya no se encuentran conmigo pero sé que desde donde ellos se encuentran guían y protegen mi camino.

Para mis padres, por apoyarme en todas las decisiones que tome para llegar hasta este momento y corregirme cuando las cosas salían de su rumbo. Con mucho amor para todas estas personas que forman parte de mi vida.

Marco Cisneros

CONTENIDO

DECLARACIÓN	I
CERTIFICACIÓN	II
AGRADECIMIENTOS	III
DEDICATORIA.....	IV
CONTENIDO.....	V
RESUMEN	XXII
PRESENTACIÓN	XXIII
CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Acero.....	1
1.2 Aplicación de los aceros en el país	1
1.3 Soldadura.....	2
1.4 Soldadura de aceros	2
1.4.1 Aceros de bajo carbono	3
1.4.2 Aceros de medio carbono	4
1.4.3 Aceros de alto carbono	5
1.4.4 Aceros inoxidables	5
1.5 Justificación técnica	7
CAPÍTULO 2	8
ACEROS INOXIDABLES	8
2.1 Definición	8
2.2 Diagramas de fase	8
2.2.1 Diagrama de fase hierro cromo	8
2.2.2 Diagrama hierro-cromo-carbono	9
2.2.3 Diagrama hierro-cromo-carbono-níquel	10

2.3	Efectos de los elementos aleantes en los aceros inoxidables	11
2.3.1	Cromo	11
2.3.2	Níquel.....	12
2.3.3	Molibdeno.....	12
2.3.4	Manganeso.....	12
2.3.5	Silicio.....	13
2.4	Resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables.....	13
2.5	Formación de carburos en los aceros inoxidables	14
2.6	Clasificación de los aceros inoxidables.....	14
2.6.1	Austenítico (series AISI 200-300).....	14
2.6.2	Ferríticos (serie AISI 400)	15
2.6.3	Martensíticos (series AISI 400-500).....	15
2.6.4	Endurecidos por precipitación (P. H.).....	15
2.6.5	Estructura duplex	15
2.7	Designación de los aceros inoxidables	16
CAPÍTULO 3		17
ACEROS AL CARBONO.....		17
3.1	Definición	17
3.2	Diagrama de equilibrio hierro- carbono.....	17
3.3	Definición de estructuras.....	20
3.3.1	Ferrita.....	20
3.3.2	Cementita.....	21
3.3.3	Perlita.....	21
3.3.4	Austenita	21
3.3.5	Ledeburita	22
3.4	Clasificación.....	22

3.4.1	Aceros de bajo contenido en carbono	22
3.4.2	Aceros de medio contenido en carbono	22
3.4.3	Aceros con alto o muy alto contenido en carbono.....	23
3.5	Elementos aleantes.....	23
3.5.1	Manganeso.....	24
3.5.2	Níquel.....	24
3.5.3	Cromo	24
3.5.4	Molibdeno.....	25
3.5.5	Vanadio	25
3.5.6	Wolframio	25
3.5.7	Silicio.....	25
3.5.8	Boro.....	25
3.6	Designación	26
CAPÍTULO 4		27
PROCESO DE SOLDADURA GTAW		27
4.1	Introducción	27
4.2	Fundamento del proceso	28
4.3	Características y ventajas del proceso.....	28
4.4	Desventajas del proceso.....	29
4.5	Tipo de corriente	29
4.5.1	Corriente alterna.....	30
4.5.2	Corriente continua	30
4.5.2.1	Corriente continua polaridad inversa	30
4.5.2.2	Corriente continua polaridad directa	31
4.6	Equipo.....	32
4.6.1	Sopletes para GTAW	33

4.7	Electrodos	35
4.7.1	Clasificación	35
4.7.2	Formas del extremo del electrodo	37
4.8	Gases protectores.....	38
4.8.1	Argón.....	39
4.8.2	Helio	39
4.8.3	Mezclas de gases con argón.....	40
4.9	Aplicaciones.....	41
CAPÍTULO 5		42
SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS INOXIDABLES Y ACEROS AL CARBONO.		42
5.1	Soldabilidad	42
5.2	Soldabilidad de los aceros	42
5.2.1	Soldabilidad de los aceros al carbono.....	43
5.2.1.1	Aceros de bajo carbono.....	43
5.2.1.2	Aceros de medio carbono.....	43
5.2.1.3	Aceros de alto carbono.....	43
5.2.2	Soldabilidad de los aceros inoxidable.....	44
5.2.2.1	Aceros inoxidable austenicos.....	44
5.2.2.2	Aceros inoxidable ferríticos.....	44
5.2.2.3	Aceros inoxidable martensíticos	44
5.3	Diagramas de constitucion.....	45
5.3.1	Diagrama de schaeffler	45
5.3.2	Diagrama delong.....	46
5.4	Factores que influyen en la soldabilidad	47
5.4.1	Material base.....	47
5.4.1.1	Carbono equivalente.....	47

5.4.1.2	Fórmulas para calcular el carbono equivalente	48
5.4.2	Temperatura de precalentamiento	61
5.4.2.1	Criterio de duren	62
5.4.2.2	Criterio de ito y bessyo	63
5.4.2.3	Criterio propuesto por suzuki	64
5.4.2.4	Criterio de suzuki y yurioka.....	65
5.4.2.5	Método de seferian	65
5.4.2.6	Método del instituto internacional de soldadura.....	67
5.5	Ensayos que determinan la soldabilidad.....	67
5.5.1	Ensayos directos de soldabilidad.	69
5.5.1.1	Ensayo finger (fisuramiento en caliente).....	69
5.5.1.2	Ensayo houldcroft (fisuramiento en caliente).....	70
5.5.1.3	Ensayo battelle (fisuramiento en caliente)	70
5.5.1.4	Ensayo de restricción de lehigh (fisuramiento en frío y en caliente)	71
5.5.1.5	Ensayo varestraint, o de restricción variable (fisuramiento en caliente)	72
5.5.1.6	Ensayo murex (fisuramiento en caliente).....	73
5.5.1.7	Ensayo de restricción y cerradura (fisuramiento en frío y en caliente)	74
5.5.1.8	Ensayo de filete circular de la armada (fisuramiento en frío y en caliente)	75
5.5.1.9	Ensayo de ranura circular (fisuramiento en frío y en caliente).....	75
5.5.1.10	Ensayo de ranura circular segmentada (fisuramiento en frío y en caliente)	76
5.5.1.11	Ensayo de parche circular (fisuramiento en frío y en caliente)	77

5.5.1.12	Ensayo de parche circular de la armada (fisuramiento en frío y en caliente)	77
5.5.1.13	Ensayo sigmajig (fisuramiento en caliente).....	78
5.5.1.14	Ensayo de implante (fisuramiento en frío)	79
5.5.1.15	Ensayo rpi de deformación incrementada (fisuramiento en frío)	80
5.5.1.16	Ensayo de severidad térmica controlada (fisuramiento en frío)	81
5.5.1.17	Ensayo de ranura de lehigh (fisuramiento en frío)	82
5.5.1.18	Ensayo de cuña (fisuramiento en frío)	82
5.5.1.19	Ensayo tekken (fisuramiento en frío)	83
5.5.1.20	Ensayo gapped bead-on-plate, g-bop (fisuramiento en frío)	84
5.5.1.21	Ensayo cruciforme (fisuramiento en frío)	84
5.5.1.22	Ensayo vinkier (fisuramiento en caliente)	85
5.5.1.23	Ensayo de ranura espiral (fisuramiento en caliente).....	86
5.5.1.24	Ensayo en cantiléver de desgarre laminar de lehigh (desgarre laminar)	87
5.5.1.25	Ensayo cranfield (desgarre laminar)	87
5.5.1.26	Ensayo tensil de desgarre laminar (desgarre laminar)	88
5.5.2	Ensayos indirectos de soldabilidad.	88
5.5.2.1	Ensayo de decantación por impulso	88
5.5.2.2	Ensayo en simuladores gleeble	89
5.5.2.3	Ensayo de ranura espiral (fisuramiento en caliente).....	89
CAPÍTULO 6		90
PROCESO EXPERIMENTAL Y REGISTROS DE SOLDADURA		90
6.	Introducción	90

6.1	Selección de los materiales base.....	90
6.2	Selección del ensayo de soldabilidad	92
6.3	Ensayos de soldabilidad	93
6.3.1	Datos técnicos del equipo de soldadura gtaw	93
6.3.2	Ensayo de soldabilidad varestraint o ensayo de restricción variable.....	94
6.3.2.1	Material base	96
6.3.2.2	Electrodos.....	97
6.3.2.3	Probetas de ensayo.....	97
6.3.2.4	Procedimiento experimental	98
6.3.2.5	Proceso de inspección.....	100
6.3.2.6	Inspección visual	100
6.3.2.7	Inspección radiográfica.....	101
6.3.2.8	Inspección microscópica.....	102
6.3.2.9	Resultados obtenidos	102
6.3.2.9.1	Resultados de la soldadura de ensayo	103
6.3.2.9.2	Resultados de la inspección de fisuras superficiales	103
6.3.2.9.3	Resultados de la inspección radiográfica.....	104
6.3.2.9.4	Resultados de la inspección microscópica	105
6.3.2.10	Análisis suplementarios	105
6.3.2.10.1	Temperaturas de enfriamiento.....	105
6.3.2.10.2	Análisis metalográfico.....	107
6.3.2.10.3	Análisis macrográfico.....	108
6.3.2.10.4	Análisis micrográfico	111
6.3.3	Ensayo de soldabilidad HOULDCROFT o ensayo de fisuramiento en caliente	116
6.3.3.1	Material base	117

6.3.3.2	Electrodos.....	117
6.3.3.3	Probetas de ensayo.....	118
6.3.3.4	Procedimiento experimental.....	119
6.3.3.5	Proceso de inspección.....	120
6.3.3.6	Inspección visual.....	120
6.3.3.7	Inspección radiográfica.....	121
6.3.3.8	Resultados obtenidos.....	121
6.3.3.8.1	Resultados de la soldadura de ensayo.....	122
6.3.3.8.2	Resultados de la inspección de fisuras superficiales.....	122
6.3.3.8.3	Resultados de la inspección radiográfica.....	123
6.3.3.9	Análisis suplementarios.....	123
6.3.3.9.1	Temperaturas de enfriamiento.....	124
6.3.3.9.2	Análisis metalográfico.....	125
6.3.3.9.3	Análisis macrográfico.....	126
6.3.3.9.4	Análisis micrográfico.....	128
6.3.4	Ensayos suplementarios.....	133
6.3.4.1	Material base.....	133
6.3.4.2	Electrodos.....	134
6.3.4.3	Probetas de ensayo.....	135
6.3.4.4	Procedimiento experimental.....	136
6.3.4.4.1	Ensayo de tracción.....	137
6.3.4.4.2	Ensayo de doblado.....	138
6.3.4.5	Resultados obtenidos.....	139
6.3.4.5.1	Resultados del ensayo de tracción.....	139
6.3.4.5.2	Resultados del ensayo de doblado.....	142
6.3.5	Temperatura de precalentamiento.....	143

6.3.5.1	Material base	143
6.3.5.2	Electrodos.....	144
6.3.5.3	Probetas de ensayo.....	144
6.3.5.4	Procedimiento experimental	145
6.3.5.5	Proceso de inspección.....	146
6.3.5.6	Inspección visual	146
6.3.5.7	Resultados obtenidos	147
6.3.5.7.1	Resultados de la soldadura de ensayo	147
6.3.5.7.2	Resultados de la inspección de fisuras superficiales	148
6.3.5.8	Análisis suplementarios	148
6.3.5.8.1	Temperatura de enfriamiento.....	148
6.3.5.8.2	Análisis metalográfico.....	150
6.3.5.8.3	Análisis macrográfico.....	151
6.3.5.8.4	Análisis micrográfico	152
CAPÍTULO 7		155
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		155
7.1	Introducción	155
7.2	Análisis del ensayo	155
7.2.1	Análisis de la soldadura de ensayo	155
7.2.2	Análisis de la inspección de fisuras superficiales	157
7.2.3	Análisis de la inspección radiográfica.....	158
7.2.4	Análisis de la curvas de enfriamiento de las probetas ensayadas.....	159
7.2.5	Análisis macrográfico de las probetas ensayadas.....	162
7.2.5.1	Probetas del ensayo Varestraint.....	162
7.2.5.2	Probetas del ensayo Houldcroft.....	162
7.2.5.3	Probetas precalentadas	163

7.2.5.4	Comparación de las probetas.....	163
7.2.6	Análisis micrográfico de las probetas ensayadas.....	164
7.2.6.1	Probetas del ensayo Varestraint.....	164
7.2.6.1.1	Probetas ensayadas con acero SAE1010	164
7.2.6.1.1.1	Metal base	164
7.2.6.1.1.2	Zona afectada por el calor ZAC.....	164
7.2.6.1.1.3	Cordón de soldadura	164
7.2.6.1.2	Probetas ensayadas con acero ASTM A-36.....	165
7.2.6.1.2.1	Metal base	165
7.2.6.1.2.2	Zona afectada por el calor ZAC.....	165
7.2.6.1.2.3	Cordón de soldadura	165
7.2.6.2	Probetas del ensayo Houldcroft.....	165
7.2.6.2.1	Probetas ensayadas con acero SAE 1010	165
7.2.6.2.1.1	Metal base	165
7.2.6.2.1.2	Zona afectada por el calor ZAC.....	166
7.2.6.2.1.3	Cordón de soldadura	166
7.2.6.2.2	Probetas ensayadas con acero ASTM A-36.....	166
7.2.6.2.2.1	Metal base	166
7.2.6.2.2.2	Zona afectada por el calor ZAC.....	166
7.2.6.2.2.3	Cordón de soldadura	167
7.2.6.3	Probetas del ensayo precalentadas.....	167
7.2.6.3.1	Probetas ensayadas con acero SAE 1010	167
7.2.6.3.1.1	Metal base	167
7.2.6.3.1.2	Zona afectada por el calor ZAC.....	167
7.2.6.3.1.3	Cordón de soldadura	167
7.2.6.3.2	Probetas ensayadas con acero ASTM A-36.....	168

7.2.6.3.2.1 Metal base	168
7.2.6.3.2.2 Zona afectada por el calor ZAC.....	168
7.2.6.3.2.3 Metal de soldadura	168
7.2.7 Ensayos suplementarios	168
7.2.7.1 Ensayo de tracción	168
7.2.7.2 Ensayo de doblado	169
CAPÍTULO 8	171
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	171
8.1 Conclusiones	171
8.2 Recomendaciones	173
BIBLIOGRAFÍA	175

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO I

Tabla 1.1 Resumen de soldabilidad de los aceros	3
---	---

CAPÍTULO II

Tabla 2.1 Designación de los aceros inoxidables.....	16
--	----

CAPÍTULO III

Tabla 3.1 Designación SAE/AISI para Aceros al Carbono	26
---	----

CAPÍTULO IV

Tabla 4.1 Tipo de corriente para diferentes materiales.	32
--	----

Tabla 4.2 Designación AWS para electrodos de tungsteno	36
--	----

Tabla 4.3 Gases inertes para GTAW	41
---	----

CAPÍTULO V

Tabla 5.1 Fórmulas para el cálculo del carbono equivalente	60
--	----

Tabla 5.2 Soldabilidad como función del carbono equivalente	61
---	----

Tabla 5.3 Temperatura de precalentamiento en función del CE y el contenido de Hidrógeno	63
--	----

CAPÍTULO VI

Tabla 6.1 Alternativas de aceros inoxidables	91
--	----

Tabla 6.2 Criterios de selección	91
--	----

Tabla 6.3 Peso específico de cada criterio.....	91
---	----

Tabla 6.4 Peso específico del criterio calidad de soldadura.....	91
--	----

Tabla 6.5 Peso específico del criterio ventaja económica.....	92
---	----

Tabla 6.6 Peso específico del criterio disponibilidad en el mercado	92
---	----

Tabla 6.7 Conclusiones.....	92
-----------------------------	----

Tabla 6.8 Especificaciones técnicas del equipo de soldadura para proceso GTAW	93
--	----

Tabla 6.9 Especificaciones de los materiales base	97
---	----

Tabla 6.10 Codificación probetas.....	98
---------------------------------------	----

Tabla 6.11 Parámetros y variables utilizadas para la soldadura de ensayo.....	103
---	-----

Tabla 6.12 Resultados de la presencia de fisuras superficiales.....	104
---	-----

Tabla 6.13 Resultados obtenidos de la inspección radiográfica.....	104
--	-----

Tabla 6.14 Inspección de las probetas microscópicamente	105
---	-----

Tabla 6.15 Curva de enfriamiento de los materiales bases del ensayo VARESTRAINT	106
Tabla 6.16 Análisis macrográfico con aumento 10X de la muestra 1 A	109
Tabla 6.17 Análisis macrográfico con aumento 10X de la muestra 1 C	109
Tabla 6.18 Análisis macrográfico con aumento 10X de la muestra 3 A	110
Tabla 6.19 Análisis macrográfico con aumento 10X de la muestra 3C	110
Tabla 6.20 Micrografías de la muestra 1 A.....	112
Tabla 6.21 Micrografías de la muestra 1C	113
Tabla 6.22 Micrografías de la muestra 3 A.....	114
Tabla 6.23 Micrografías de la muestra 3C	115
Tabla 6.24 Codificación de las probetas	118
Tabla 6.25 Parámetros y variables utilizadas para la soldadura de ensayo.....	122
Tabla 6.26 Resultados de la presencia de fisuras superficiales.....	123
Tabla 6.27 Resultados obtenidos de la inspección radiográfica.....	123
Tabla 6.28 Curva de enfriamiento del ensayo HOULDCROFT	124
Tabla 6.29 Análisis macrográfico con aumento 10X de la muestra 1C	126
Tabla 6.30 Análisis macrográfico con aumento 10X de la muestra 1B	127
Tabla 6.31 Análisis macrográfico con aumento 10X de la muestra 3 A	127
Tabla 6.32 Análisis macrográfico con aumento 10X de la muestra 3C	128
Tabla 6.33 Micrografías de la muestra 1C	129
Tabla 6.34 Micrografías de la muestra 1B.....	130
Tabla 6.35 Micrografías de la muestra 3 A.....	131
Tabla 6.36 Micrografías de la muestra 3C	132
Tabla 6.37 Codificación probetas	136
Tabla 6.38 Resistencia a la tracción de las probetas ensayadas.....	140
Tabla 6.39 Resultados del ensayo de doblado	142
Tabla 6.40 Codificación probetas	145
Tabla 6.41 Parámetros y variables utilizadas para la soldadura de ensayo.....	147
Tabla 6.42 Resultados de la presencia de fisuras superficiales.....	148
Tabla 6.43 Curva de enfriamiento probetas precalentadas.....	149
Tabla 6.44 Análisis macrográfico con aumento 10X de la muestra P1	151
Tabla 6.45 Análisis macrográfico con aumento 10X de la muestra P2	152
Tabla 6.46 Micrografías de la muestra P1.....	153

Tabla 6.47 Micrografías de la muestra P2.....	154
---	-----

CAPÍTULO VII

Tabla 7.1 Heat input de las probetas ensayadas	156
--	-----

Tabla 7.2 Resultados de la inspección superficial de las probetas ensayadas ..	158
--	-----

Tabla 7.3 Tabla de las discontinuidades encontradas en las radiografías	159
---	-----

Tabla 7.4 Valores de resistencia a la tracción	169
--	-----

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO II

Figura 2.1 Diagrama Fe-Cr.....	9
Figura 2.2 Diagrama Fe-Cr-C.....	10
Figura 2.3 Diagrama Fe-Cr-C-Ni	11

CAPÍTULO III

Figura 3.1 Diagrama de equilibrio hierro-carbono	20
--	----

CAPÍTULO IV

Figura 4.1 Diagrama esquemático del proceso de soldadura GTAW.....	28
Figura 4.2 La distribución de calor entre el electrodo de tungsteno y el trabajo con cada tipo de corriente.....	31
Figura 4.3 Equipo GTAW	32
Figura 4.4 Esquema proceso GTAW.....	33
Figura 4.5 Soplete para GTAW	33
Figura 4.6 Formas posibles para electrodos de tungsteno.....	37
Figura 4.7 Extremos redondos para electrodos de tungsteno.....	38

CAPÍTULO V

Figura 5.1 Diagrama de Schaeffler.....	45
Figura 5.2 Diagrama de Delong	46
Figura 5.3 Gráfico de Seferian	66
Figura 5.4 Gráfica del IIW	67
Figura 5.5 Esquema del ensayo Finger	70
Figura 5.6 Esquema de la probeta para ensayo Houldcroft	70
Figura 5.7 Esquema de la probeta para ensayo Battelle.....	71
Figura 5.8 Esquema de la probeta para ensayo Lehigh	72
Figura 5.9 Esquema del ensayo Varestraint.....	73
Figura 5.10 Esquema del ensayo Murex.....	74
Figura 5.11 Esquema del ensayo de restricción y cerradura	74
Figura 5.12 Ensayo de filete circular de la armada	75
Figura 5.13 Ensayo de ranura circular	76
Figura 5.14 Ensayo de ranura circular segmentada	76
Figura 5.15 Ensayo de parche circular	77

Figura 5.16 Ensayo de parche circular de la armada	78
Figura 5.17 Esquema básico del funcionamiento del ensayo Sigmajig	79
Figura 5.18 Disposición de la placa y probeta en el ensayo de implante	80
Figura 5.19 Esquema del ensayo RPI.....	80
Figura 5.20 Ensayo CTS	81
Figura 5.21 Ensayo de ranura de Lehigh	82
Figura 5.22 Ensayo de cuña.....	83
Figura 5.23 Ensayo Tekken.....	83
Figura 5.24 Esquema del ensayo G-BOP	84
Figura 5.25 Ensayo cruciforme.....	85
Figura 5. 26 Ensayo Vinkier	86
Figura 5. 27 Ensayo de ranura espiral	86
Figura 5.28 Ensayo en cantiléver de desgarre laminar	87
Figura 5.29 Esquema del ensayo Cranfield	88
Figura 5.30 Ensayo tensil de desgarre laminar	88

CAPÍTULO VI

Figura 6.1 Probeta e Instalación del Ensayo Varestraint.....	95
Figura 6.2 Material base para el ensayo Varestraint.....	96
Figura 6.3 Codificación de las probetas utilizadas para el ensayo Varestraint.....	98
Figura 6.4 Ensayo Varestraint (Probetas ensayadas)	99
Figura 6.5 Inspección visual de fisuras superficiales.....	100
Figura 6.6 Inspección de fisuras superficiales mediante tintas penetrantes.....	101
Figura 6.7 Radiografías de las probetas	102
Figura 6.8 Inspección microscópica de fisuras.....	102
Figura 6.9 Curva de enfriamiento de las probetas ensayadas	107
Figura 6.10 Probetas para ensayo metalográfico.....	107
Figura 6.11 Dimensiones del espécimen para el ensayo Houldcroft.....	116
Figura 6.12 Material base para el ensayo Houldcroft.....	117
Figura 6.13 Codificación de las probetas utilizadas para el ensayo Houldcroft...	119
Figura 6.14 Ensayo Houldcroft (Probetas ensayadas)	120
Figura 6.15 Inspección visual de fisuras superficiales.....	121
Figura 6.16 Radiografías de las probetas ensayadas	121
Figura 6.17 Curvas de enfriamiento del ensayo HOULDCROFT	125

Figura 6.18 Probetas para ensayo metalográfico.....	125
Figura 6.19 Dimensiones y ubicaciones de las probetas para ensayos destructivos	134
Figura 6.20 Esquema de un ensayo de tracción	137
Figura 6.21 Esquema de un ensayo de doblado.....	139
Figura 6.22 Curva de esfuerzo vs deformación de la probeta T2 – A36	140
Figura 6.23 Curva de esfuerzo vs deformación de la probeta T7 – A36	141
Figura 6.24 Curva de esfuerzo vs deformación de la probeta T2 – SAE1010....	141
Figura 6.25 Curva de esfuerzo vs deformación de la probeta T7 – SAE1010....	142
Figura 6.26 Material base para las probetas	144
Figura 6.27 Probetas ensayadas.....	146
Figura 6.28 Inspección visual de fisuras superficiales.....	147
Figura 6.29 Curva de enfriamientos probetas precalentadas.....	149
Figura 6.30 Probetas para ensayo metalográfico.....	150\

CAPÍTULO VII

Figura 7.1 Curvas de enfriamiento de las probetas ensayadas con acero SAE 1010	160
Figura 7.2 Curvas de enfriamiento de las probetas ensayadas con acero ASTM A-36	161

RESUMEN

Este proyecto previo a la obtención del Título de Ingeniero Mecánico es desarrollado con el objetivo de analizar la soldabilidad de aceros al carbono con aceros inoxidable, realizando la unión entre estos aceros disimiles mediante el proceso GTAW sin la utilización de material de aporte, para lo cual se realiza ensayos de soldabilidad Varestraint y Houldcroft, que son ensayos para analizar soldaduras bajo el proceso GTAW.

El proyecto inicia con un breve estudio del acero, sus tipos y la soldadura de estos, haciendo énfasis en los aceros al carbono y los aceros inoxidable, que son el objetivo del proyecto. Estos aceros son estudiados con más detalle posteriormente, principalmente las propiedades que estos materiales presentan, su constitución y como son designados a nivel internacional. En un siguiente capítulo se realiza el estudio del proceso de soldadura GTAW, tomando en cuenta las características, ventajas, desventajas y aplicaciones que presenta este tipo de proceso.

Posteriormente se estudia la soldabilidad de los aceros inoxidable y los aceros al carbono, los diferentes tipos de ensayos que determinan la soldabilidad, los factores que influyen en la soldabilidad, con el fin de seleccionar los parámetros adecuados y el ensayo que nos permita realizar el análisis que se plantea el proyecto.

En el proceso experimental se procede a realizar los ensayos de soldabilidad que se seleccionaron, se procede a registrar los datos de los parámetros bajo los cuales se realizan estos ensayos, y luego de esto se procede a realizar un análisis en búsqueda de los posibles defectos que pueden ocurrir en la soldadura. El análisis consiste en realizar inspecciones no destructivas a la soldadura, como inspección visual, tintas penetrantes, radiografías, macrografías y micrografías.

El análisis de resultados comprende la comparación entre el comportamiento durante el proceso experimental de los distintos aceros usados en el proyecto, con el fin de determinar cuál es la mejor opción al momento de seleccionar el material base, las variables con las que se debe soldar. Finalizando con las conclusiones y recomendaciones que se generan al realizar el análisis de resultados.

PRESENTACIÓN

El Proyecto Soldabilidad de Aceros Inoxidables con Aceros al Carbono mediante el proceso de soldadura GTAW, se orienta a definir si existe una excelente soldabilidad entre este tipo de aceros disimiles, y a comparar el comportamiento de un acero ASTM A-36 con un acero SAE 1010 al ser soldados a un acero inoxidable AISI 304 bajo las mismas condiciones.

Al aprovechar las características del proceso GTAW, el cual nos permite soldar aceros de bajos espesores sin la necesidad de usar material de aporte, se pretende encontrar los parámetros ideales para soldar estos aceros, y de esta manera contribuir con las industria del país en donde se presente la necesidad de unir aceros disimiles en especial aceros inoxidables con aceros al carbono, y en donde es difícil encontrar el material de aporte ideal para estas uniones especiales, y sin usar material de aporte los costos de la soldadura se reducirían.

Con los ensayos de soldabilidad seleccionados, se simulan condiciones extremas de formación de defectos, al aumentar las tensiones residuales, creando concentradores de esfuerzos en las probetas, esto con el fin de encontrar soluciones a defectos que se presenten, cambiando variables de la soldadura hasta encontrar las variables que permitan evitar que se produzcan los defectos.

Al usar distintos materiales, se corrobora si es posible o no soldar aceros al carbono con aceros inoxidables bajo el proceso GTAW, y principalmente sin el uso de material de aporte.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 ACERO

Esencialmente, el acero es una aleación de dos elementos: el hierro y el carbono, este último en una proporción que varía desde pocas centésimas hasta el 1,67 por ciento. Todos los aceros contienen proporciones variables de manganeso y silicio, lo mismo que pequeñas cantidades de azufre y fósforo. Pueden también contener cantidades variables de otros elementos de aleación, que imparten ciertas propiedades especiales.¹

1.2 APLICACIÓN DE LOS ACEROS EN EL PAÍS

El acero es de los metales más comunes y más utilizados debido a sus propiedades mecánicas y químicas, su facilidad de aleación y su precio.

En el país el acero ocupa un lugar importante en los materiales más utilizados en varios campos; como son el automotriz, la construcción, maquinaria, entre otros; por lo que la elaboración de acero e importación de este constituye una parte importante del mercado industrial del Ecuador.

Teniendo así un mercado amplio y variado, donde se puede encontrar aceros de distintas composiciones, espesores y denominaciones. Esta ampliación del mercado y la industria del acero surgió a partir de la instauración de industrias petroleras, automotrices y otros, así como la gran demanda de la construcción en los años 70 en nuestro territorio, dando así a la apertura del mercado metalmeccánico y el nacimiento de varias acerías nacionales; que con el tiempo han tomado fuerza y se han establecido como grandes industrias nacionales.

¹ ERNITZ, Anatolio; (1955): *“Manual De Hierros Y Aceros”*; Alcina ediciones; Argentina; pág. 5.

1.3 SOLDADURA²

La soldadura puede definirse como un proceso de unión entre metales en el que la adherencia se produce, con aporte de calor, con aplicación de presión o sin ella y con la adición o no de metal.

Generalmente se consideran varios tipos de soldaduras, entre los que se pueden resaltar los siguientes:

- Soldadura Blanda: caracterizada porque las aleaciones que emplea tienen una temperatura de fusión inferior a los 450°C y su resistencia mecánica es muy baja.
- Soldadura Fuerte: en la que la temperatura de fusión de las aleaciones empleadas para soldar es superior a 450°C. con esta soldadura se consigue una mayor resistencia mecánica de la unión.
- Soldadura por arco eléctrico: consiste en provocar la fusión de los bordes que se desea soldar mediante el calor intenso desarrollado por un arco eléctrico. Los bordes en fusión de las piezas y el material fundido que se separa del electrodo se mezclan íntimamente, formando, al enfriarse, una pieza única, resistente y homogénea.
- Soldadura por resistencia eléctrica: Este tipo de soldadura se basa en el efecto Joule: el calentamiento se produce al pasar una corriente eléctrica a través de la unión de las piezas.

1.4 SOLDADURA DE ACEROS

Los aceros, son metales más soldables en la industria, ya que son compatibles con la mayoría de métodos de soldadura existentes. Las dificultades surgen al tratar de unir aceros de distintos tipos.

Al hablar de aceros al carbono, se puede decir que todos los aceros con carbono pueden soldarse, por lo menos, con un método. No obstante, cuanto más alto sea el contenido de carbono en el metal, mayor será la dificultad para soldar el acero.

² CEMBRERO, Jesús; (2005); *"Ciencia y tecnología de materiales"*; Editorial Prentice Hall; Madrid-España; pág. 51.

En la tabla 1.1 podemos observar un resumen de la capacidad de algunos aceros de ser soldados mediante diversos procesos de soldadura; como son soldadura por arco, soldadura fuerte y soldadura blanda; este resumen también toma en cuenta esta capacidad de acuerdo al espesor que presente acero.

Tabla 1. 1 Resumen de soldabilidad de los aceros³

Tabla Material	E s p e s o r	Proceso de Unión															
		Soldadura por Arco							Soldadura Fuerte							S	
		S M A W	S A W	G M A W	F C A W	G T A W	R W	F W	O F W	T B	F B	I B	R B	D B	I R B		D F B
Acero al Carbono	S	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	I	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X
	M	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X				X	
	T	X	X	X	X			X	X		X					X	
Acero de media Aleación	S	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	I	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X				X	X
	M	X	X	X	X			X		X	X	X				X	
	T	X	X	X	X		X	X		X					X		
Acero Inoxidable	S	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	I	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X				X	X
	M	X	X	X	X			X		X	X	X				X	
	T	X	X	X	X			X								X	

Donde:

S: espesor de hasta 3mm o 1/8 de pulgada.

I: espesor desde 3 mm hasta 6 mm o de 1/8 a 1/4 de pulgada.

M: espesor desde 6mm hasta 19mm o de 1/4 a 3/4 de pulgada.

T: espesor de más de 19mm o 3/4 de pulgada o más.

1.4.1 ACEROS DE BAJO CARBONO⁴

El acero bajo en carbono tiene un contenido de carbono de 0,15% o menos y el acero dulce tiene un rango de 0,15% a 0,30%. Los dos aceros pueden soldar

³ JEFFUS, Larry; (2005); "Soldadura: principios y aplicaciones"; Editorial Nobel; España; pág. 636.

⁴ JEFFUS, Larry; (2005); "Soldadura: principios y aplicaciones"; Editorial Nobel; España; pág.420.

fácilmente por todos los procesos de soldadura. Las soldaduras resultantes son de alta calidad extrema. La soldadura de oxiacetilénica de estos aceros puede hacerse utilizando una flama neutral. Las juntas soldadas por este proceso son de alta calidad y la zona de fusión no es dura o frágil.

Los aceros de bajo carbono se pueden soldar rápidamente por el método de soldadura por arco metálico protegido. La selección del electrodo correcto para la aplicación de soldadura particular ayuda a asegurar fuerza alta y ductilidad en la soldadura. Los procesos de soldadura por arco bajo gas protector metálico y de soldadura por arco con núcleo de fundente se utilizan para soldar aceros bajos en carbono y medio por su facilidad de soldado y porque previenen la contaminación de la soldadura. La alta productividad y los bajos costes los hacen procesos de soldadura cada vez más populares, el proceso de soldadura por arco con gas de tungsteno es lento y causará mucha porosidad en la soldadura, si el acero no está completamente desgasificado (el metal desgasificado al cual se le ha eliminado el gas normalmente disuelto en el metal durante la fabricación). GTAW puede hacer soldaduras superiores con una muy elevada calidad de rayos X.

1.4.2 ACEROS DE MEDIO CARBONO⁵

Se lleva a cabo la mejor soldadura de aceros con carbono medio, que tienen de 0,30% a 0,50% de contenido de carbono, por medio de varios procesos de fusión, dependiendo del contenido de carbono en el metal base. Las técnicas de soldadura y los materiales utilizados son dictados por las características metalúrgicas del metal a ser soldado. Para aceros con un contenido de más de 0,40% de carbono, tratamientos de calentamiento previo tratamiento posterior se requieren generalmente para producir una soldadura satisfactoria. Electrodo de arco protegido del tipo utilizado en aceros bajos en carbono se pueden utilizar para soldaduras de este tipo de acero. Puede que sea necesario el uso de un electrodo con un contenido especial de hidrógeno para reducir la tendencia a grietas bajo cordones.

⁵ JEFFUS, Larry; (2005); "Soldadura: principios y aplicaciones"; Editorial Nobel; España; pág.422.

El acero al carbono medio se puede soldar por resistencia. No obstante, se pueden requerir técnicas especiales. Otros métodos de soldadura pueden producir soldaduras sólidas en acero al carbono medio que incluyen la soldadura por arco sumergido, soldadura con termita, soldadura con gas y soldaduras de punto, de chispas y de costura.

1.4.3 ACEROS DE ALTO CARBONO⁶

Generalmente los aceros altos en carbono tienen un contenido de carbono de 0,50% a 0,90%. Estos aceros son mucho más difíciles de soldar que cualquiera de los aceros bajos en carbono o medio. Por el alto contenido de carbono, la zona afectada por el calor se puede transformar en martensita muy dura y frágil. El soldador puede evitar esto, utilizando procedimientos de calentamiento previo y seleccionando los que producen entradas de energía alta en la soldadura. La martensita que se forma es revenida por un tratamiento de calor posterior tal como el alivio de tensión por recocido.

En la soldadura por arco de acero alto en carbono, se utilizan generalmente electrodos de arco protegido para acero de arco templado. Sin embargo, el metal soldado no retiene su ductilidad normal porque absorbe algo del carbono desde el acero. Los electrodos de acero austenítico se pueden utilizar algunas veces para obtener mejor ductilidad en la soldadura.

Con frecuencia la soldadura se hace en aceros altos en carbono para aumentar la superficie desgastado a sus dimensiones originales o para desarrollar una superficie dura. En este tipo de soldadura, el calentamiento previo o calentamiento posterior puede no ser necesario por la manera en que el calor se acumula en la pieza durante la soldadura continua.

1.4.4 ACEROS INOXIDABLES⁷

Los aceros inoxidable se componen de cuatro grupos de aleaciones: las austeníticas, las ferríticas, las martensíticas y las de endurecimiento por

⁶ JEFFUS, Larry; (2005); "*Soldadura: principios y aplicaciones*"; Editorial Nobel; España; pág.424.

⁷ JEFFUS, Larry; (2005); "*Soldadura: principios y aplicaciones*"; Editorial Nobel; España; pág.426.

precipitación. El grupo de las austenitas es el más común. Su contenido de cromo proporciona resistencia a la corrosión, mientras que el contenido de níquel produce la microestructura austenita fuerte. Estos aceros son relativamente fáciles de soldar y están disponibles en una gran variedad de tipos de electrodos. Los más utilizados son los aceros inoxidable cromo-níquel austenita. Se utilizan para aplicaciones tales como equipamientos químicos, utensilios de cocina, equipos de procesamiento de comida y piezas de hornos.

Para mejorar la soldabilidad, el contenido de carbono debería ser el más bajo posible. El carbono no debe ser de más de 0,03%, con el máximo siendo menos de 0,10%. El mantener el contenido de carbono inferior en el acero inoxidable ayuda a reducir precipitaciones de carburo. Las precipitaciones de carburo ocurren cuando se calientan las aleaciones que contienen cromo y carbono. El cromo y el carbono se combinan para formar carburo de cromo.

En los aceros inoxidable ferríticos, el coeficiente de expansión térmica es inferior a los tipos austeníticos y es casi el mismo como los aceros al carbono. Los procesos de soldadura que tienden a aumentar la adición de carbono no son recomendables, estos incluyen el proceso de oxi-gas combustible, el proceso carbon arc, y la soldadura de arco metálico con gas CO₂ protector.

Carburos de cromo muestran las tendencias hacia el endurecimiento con estructura de tipo martensítica en los límites de grano en la zona de la soldadura. Esto reduce la ductilidad, tenacidad y resistencia a la corrosión en la soldadura. Para secciones gruesas, un precalentamiento de 200°C es beneficioso. Para restaurar la resistencia a la corrosión y mejorar la ductilidad después de la soldadura un recocido a 760-820°C, seguido de un enfriamiento en agua o aire, es recomendable. El tamaño de grano grande seguirá existiendo, sin embargo, la dureza y la tenacidad pueden ser alteradas. La tenacidad se puede mejorar sólo por el trabajo en frío de la soldadura.

Si el tratamiento térmico después de la soldadura no es posible, y las demandas de servicio y resistencia al impacto son necesarias, un aporte de acero inoxidable austenítico debe ser utilizado. De lo contrario, el metal de aporte seleccionado debe coincidir con el metal de base.

Para los aceros martensíticos, los de bajo contenido de carbono hacen que se puedan soldar sin precauciones especiales. Los tipos con más de 0,15% de

carbono tienden a ser endurecidos al aire y, por tanto, se requiere de precalentamiento y postcalentamiento de soldaduras. Un rango de temperatura de precalentamiento de 230-290°C se recomienda. Un postcalentamiento se debe seguir inmediatamente a la aplicación de la soldadura y debe estar en el rango de 650-760°C, seguido de un enfriamiento lento.

Si un precalentamiento y postcalentamiento no es posible, un relleno de acero inoxidable austenítico debe ser utilizado. El acero tipo 416S para mecanizado no debe ser soldado. Los procesos de soldadura que tienden a aumentar la recolección de carbono no son recomendables. Aumentar el contenido de carbono genera mayor sensibilidad a las grietas en el área de soldadura.

1.5 JUSTIFICACIÓN TÉCNICA

Tanto los aceros al carbono como los inoxidables son utilizados en la industria por sus propiedades mecánicas y características relativas de corrosión.

Las soldaduras entre diferentes materiales sufren 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 conociendo 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.

CAPÍTULO 2

ACEROS INOXIDABLES

2.1 DEFINICIÓN

Los aceros inoxidables son aleaciones en las cuales el cromo está presente con un porcentaje mínimo de 10,5% en peso. A más de ser un acero de gran pureza, es resistente a la corrosión debido a que los elementos aleantes que posee como el níquel y el cromo reaccionan con el oxígeno para formar una película delgada, dura y muy adherente; en la mayoría de aceros inoxidables el contenido máximo de cromo es del 30% y un 50% mínimo de contenido de hierro. Normalmente la presencia de carbono en estos aceros va desde un 0.03 % hasta 1,2% en ciertas calidades martensíticas.

Con el objeto de mejorar ciertas propiedades de estos aceros se adicionan otros elementos aleantes como son níquel, molibdeno, cobre, titanio, aluminio, silicio, niobio, nitrógeno, azufre y selenio.⁸

2.2 DIAGRAMAS DE FASE

Los diagramas de fase en equilibrio se usan para describir las transformaciones de fase y las fases estables presentes en los aceros inoxidables. Los diagramas de fase se usan también para predecir la evolución de la microestructura en los diferentes grados de los aceros inoxidables.

2.2.1 DIAGRAMA DE FASE HIERRO CROMO

El diagrama de equilibrio hierro cromo representado en la figura 2.1, muestra que los dos elementos son solubles uno en el otro en el estado líquido, formando al enfriarse, una serie continua de soluciones sólidas. El mismo diagrama nos

⁸ MANGONON, Pat; (2001); "Ciencia de Materiales y Selección"; Editorial Pearson; Primera edición; España; pág. 215.

muestra la existencia de un contenido intermetálico FeCr, dentro de los límites de indicados, llamado constituyente sigma.

Los efectos más importantes del cromo se manifiestan hasta un contenido del mismo de 20%, bajando, luego elevando la temperatura del punto de transformación del hierro alfa en hierro gama y bajando la temperatura del punto de transformación del hierro delta en hierro gama. Como resultado, los dos puntos críticos se acercan hasta unirse, para dar lugar a la llamada curva gama. Esto ocurre para la aleación 12% cromo- 88% hierro.

El diagrama muestra que al calentar una aleación con 8% de cromo, la misma se transforma en una solución sólida gama al llegar a la parte inferior de la curva. Al seguir calentando en esta región, la estructura vuelve a ser ferrítica arriba de 1260°C. Estas transformaciones son esencialmente reversibles y se presentan nuevamente durante el proceso de enfriamiento.⁹

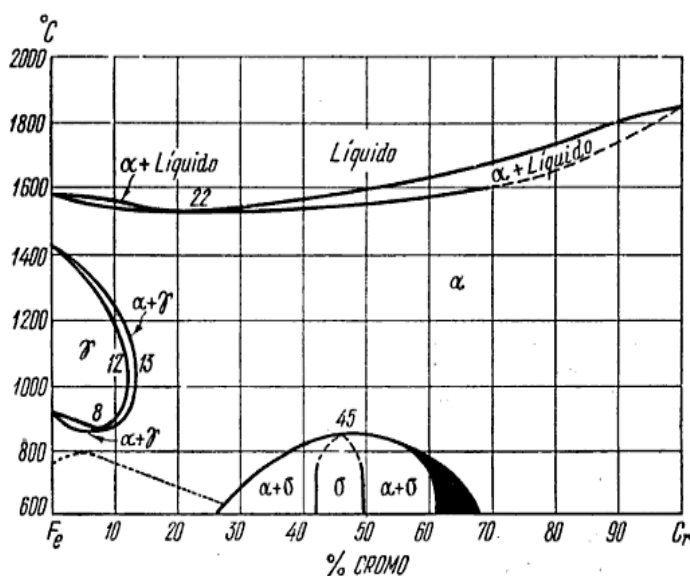


Figura 2.1 Diagrama Fe-Cr¹⁰

2.2.2 DIAGRAMA HIERRO-CROMO-CARBONO

El principal efecto de agregar carbono es modificar la forma de la curva gama, haciendo que la misma sea trasladada hacia la derecha a medida que aumenta el contenido de carbono.

⁹ ISTRATI, George;(1961); "Manual de los Aceros Inoxidables"; Editorial Alsina; Argentina; pág. 27.

¹⁰ ISTRATI, George;(1961); "Manual de los Aceros Inoxidables"; Editorial Alsina; Argentina; pág. 28.

En la figura 2.2, se ha representado el diagrama de equilibrio del sistema hierro-cromo con un contenido fijo de 0,1% carbono. Se puede ver que, al calentar una aleación que contiene 11,5% cromo y 0,1% carbono, la estructura ferrítica de la aleación sufre un cambio de fase al llegar al límite Ferrita más Austenita. Durante este cambio, hay un principio de formación de estructura austenítica y siguiendo con el calentamiento, toda la aleación pasa a ser austenítica.

Los carburos de cromo que se encuentran en la estructura primitiva se disuelven en la austenita, proporcionalmente con el tiempo durante el cual la aleación es mantenida a la temperatura necesaria.

En el caso de esta aleación (11,5% cromo, 0,1% carbono) es recomendable mantener a una temperatura de 1000°C antes de proceder a templar; el enfriamiento rápido permitirá a la austenita transformarse en el constituyente duro llamado martensita.¹¹

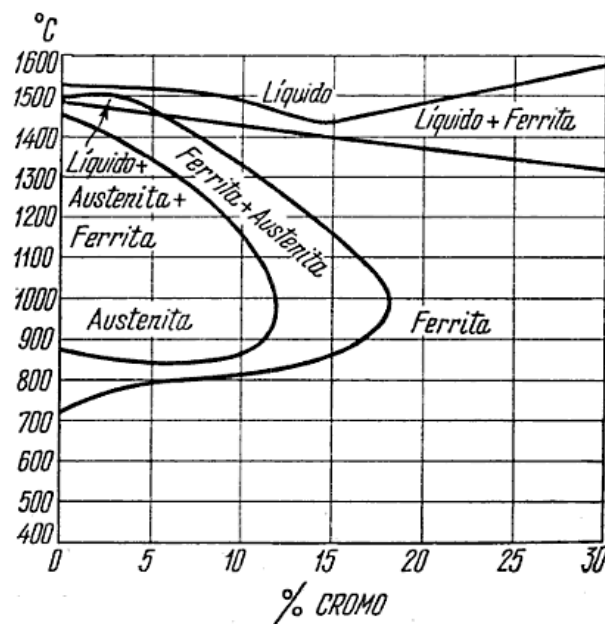


Figura 2.2 Diagrama Fe-Cr-C¹²

2.2.3 DIAGRAMA HIERRO-CROMO-CARBONO-NÍQUEL

Agregando progresivamente níquel a una aleación con 18% cromo, la proporción de solución sólida austenítica en la aleación aumenta hasta que toda la estructura

¹¹ ISTRATI, George; (1961); "Manual de los Aceros Inoxidables"; Editorial Alsina; Argentina; pág. 26.

¹² ISTRATI, George; (1961); "Manual de los Aceros Inoxidables"; Editorial Alsina; Argentina; pág. 27.

sea austenítica, aún a la temperatura ambiente. El diagrama de equilibrio, representado en la figura 2.3, muestra que una aleación con 18% de cromo y 1% de carbono es completamente austenítica a todas las temperaturas para un contenido de níquel del 7%.

La fase carburo de cromo es presente, bajo las condiciones de equilibrio debajo de la línea de solubilidad del carburo, a la temperatura de 982°C, según muestra el diagrama. Resulta que si una aleación austenítica, que contiene en su solución sólida carburo de cromo precipitado, es calentada arriba del límite de solubilidad del carburo, el mismo se disolverá completamente en el resto del material. En la práctica, sin embargo, es necesario calentar hasta 1000°C-1120°C.¹³

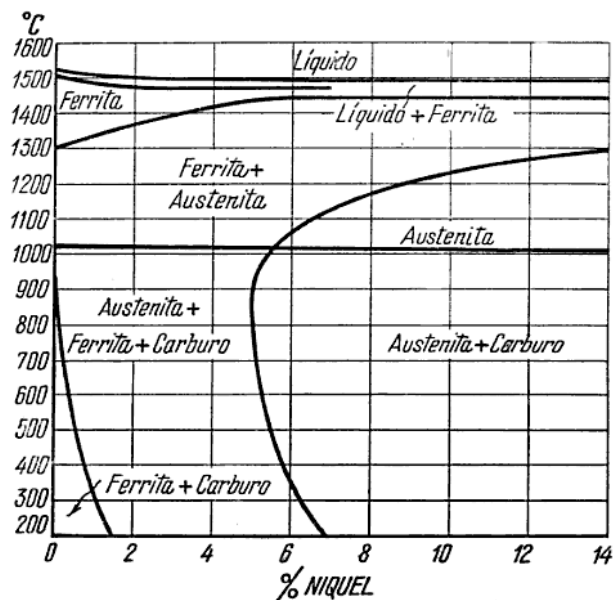


Figura 2.3 Diagrama Fe-Cr-C-Ni¹⁴

2.3 EFECTOS DE LOS ELEMENTOS ALEANTES EN LOS ACEROS INOXIDABLES

2.3.1 CROMO

Es el principal aleante en los aceros inoxidable y el que los previene de la corrosión por su afinidad con el oxígeno para formar óxido de cromo. Una

¹³ ISTRATI, George; (1961); "Manual de los Aceros Inoxidables"; Editorial Alsina; Argentina; pág. 28.

¹⁴ ISTRATI, George; (1961); "Manual de los Aceros Inoxidables"; Editorial Alsina; Argentina; pág. 28.

característica de la presencia del cromo en los aceros inoxidable es la formación de ferrita, un acero inoxidable que tenga más de 12% en peso de cromo se torna casi completamente ferrítico.¹⁵

2.3.2 NÍQUEL

El níquel es agregado a estos aceros principalmente para mejorar las propiedades mecánicas de estos, ya que amplía el campo de estabilidad de la austenita a temperatura ambiente, incluso a temperaturas menores.¹⁶

2.3.3 MOLIBDENO

Es un elemento de aleación relativamente costoso. Es un fuerte formador de carburo y de manera similar al cromo aumenta la dureza.

El objeto de agregar molibdeno a los aceros inoxidables es el de mejorar la resistencia de este a la corrosión, en especial a la corrosión por picadura. Otra razón para usar este elemento es que mejora la resistencia a las altas temperaturas del acero inoxidable.¹⁷

2.3.4 MANGANESO

Este aleante es utilizado en los aceros inoxidables ya que hace el papel de un estabilizador la fase austenítica, se utiliza para compensar bajos contenidos de níquel por sus similares características.

El manganeso es un gran estabilizador de la fase austenítica a bajas temperaturas ayudando a prevenir la transformación a martensita.

Para ser aleante debe exceder en 0,8% de contenido en peso; y cuando el contenido de manganeso excede el 10%, el acero será austenítico.

Es un débil formador de carburo y tiene un efecto moderado sobre la templabilidad.¹⁸

¹⁵ PASCUAL, J; (1970); *"Técnica y Práctica del tratamiento térmico de los Metales Ferrosos"*; Blume; España; pág. 120.

¹⁶ PASCUAL, J; (1970); *"Técnica y Práctica del tratamiento térmico de los Metales Ferrosos"*; Blume; España; pág. 120.

¹⁷ PASCUAL, J; (1970); *"Técnica y Práctica del tratamiento térmico de los Metales Ferrosos"*; Blume; España; pág. 120.

¹⁸ PASCUAL, J; (1970); *"Técnica y Práctica del tratamiento térmico de los Metales Ferrosos"*; Blume; España; pág. 121.

2.3.5 SILICIO

Esté elemento está presente en todos los aceros al igual que el manganeso, como un desoxidador barato.

Incrementa la resistencia en caliente, y disminuye la resistencia a la corrosión intergranular, especialmente en los aceros que contienen molibdeno.

No es un formador de carburo, sino que se disuelve en ferrita aumentando así la resistencia y la tenacidad.¹⁹

2.4 RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DE LOS ACEROS INOXIDABLES

Todos los aceros inoxidables contienen el cromo suficiente para darles sus características de inoxidables. Muchas aleaciones inoxidables contienen además níquel para reforzar aún más su resistencia a la corrosión. Pero esto no hace a los aceros inoxidables completamente invulnerables, se puede encontrar algunos tipos de corrosión en los mismos.

La corrosión generalizada y localizada se puede presentar en estos aceros; dentro de la corrosión localizada se tienen fenómenos de corrosión intergranular, por picadura y por fisuras son las que más se destacan.

La corrosión generalizada se presenta cuando la capa de óxido de cromo ha disminuido de manera uniforme en el acero inoxidable, generalmente se da cuando se seleccionó mal el acero para el trabajo que está realizando.

La corrosión intergranular se presenta en los aceros inoxidables, por la precipitación de los carburos en las juntas de los granos, estos carburos dejan al acero desprovisto de cromo haciéndolo así susceptible a la corrosión.

La corrosión por picadura comienza como resultado de la rotura local de la capa de óxido de cromo (pasiva), normalmente por iones cloruro, aunque otros haluros y otros aniones pueden tener un efecto similar.

¹⁹ PASCUAL, J; (1970); "Técnica y Práctica del tratamiento térmico de los Metales Ferrosos"; Blume; España; pág. 121.

La corrosión por fisuras ocurre cuando el acero presenta grietas que pueden ser atacadas por agentes corrosivos; dando así lugar a un cambio químico. Se puede presentar fácilmente en medios donde se encuentran soluciones iónicas.

2.5 FORMACIÓN DE CARBUROS EN LOS ACEROS INOXIDABLES

Los problemas fundamentales de los aceros inoxidable se relacionan generalmente con la pérdida de su resistencia a la corrosión (sensibilización) cuando el cromo en solución desciende por debajo del 12%. La disminución del cromo suele provocar la formación de carburos de cromo en los bordes de grano especialmente a temperaturas elevadas; por ello, un procedimiento para prevenir es mantener el contenido de carbono lo más bajo posible, usualmente inferior a un 0,10%. Otro método es bloquear el carbono con pequeñas cantidades de elementos estabilizadores, tales como el titanio o niobio, aleantes dotados de mayor afinidad para formar carburos. Enfriando estos metales rápidamente desde la zona de los 480°C a los 820°C se retrasa así mismo la formación de carburos.²⁰

2.6 CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS INOXIDABLES

Los aceros inoxidable se clasifican de la siguiente forma:

2.6.1 AUSTENITICO (SERIES AISI 200-300)

Estos aceros están compuestos generalmente de cromo, níquel y manganeso en el hierro. Entre sus propiedades se destacan el antimagnetismo y una excelente resistencia a la corrosión, aunque son susceptibles al agrietamiento por esfuerzo de corrosión los aceros inoxidable austeníticos se endurecen por trabajo en frío. Y presentan la mayor ductilidad de todos los aceros inoxidable, por lo que son fácilmente formados.²¹

²⁰ DEGARMO, P; (1994); *"Materiales y Procesos de Fabricación"*; Editorial Reverté; España; pág. 205.

²¹ KALPAKJIAN, Serope; (2002); *"Manufactura, ingeniería y tecnología"*; Pearson Educación; México; pág. 148.

2.6.2 FERRÍTICOS (SERIE AISI 400)

Estos aceros presentan un alto contenido de cromo, alrededor de un 27% en peso. Son magnéticos y tienen una buena resistencia a la corrosión y su ductilidad es menor a la de los aceros inoxidable austeníticos. Estos aceros se endurecen al trabajarlos en frío y no pueden ser sometidos a tratamientos térmicos.²²

2.6.3 MARTENSÍTICOS (SERIES AISI 400-500)

La mayor parte de estos aceros inoxidable no contienen níquel y pueden ser endurecidos por tratamiento térmico. Pueden alcanzar un contenido de cromo de 18% en peso. Entre sus propiedades tenemos que son magnéticos, poseen una elevada resistencia, dureza y resistencia a la fatiga; buena ductilidad y una moderada resistencia a la corrosión.²³

2.6.4 ENDURECIDOS POR PRECIPITACIÓN (P. H.)

Estos aceros poseen cromo y níquel, además de cobre, aluminio, titanio o molibdeno. Poseen una buena resistencia a la corrosión, buena ductilidad y resistencia a altas temperaturas.²⁴

2.6.5 ESTRUCTURA DUPLEX

Estos aceros tienen una mezcla de austenita y de ferrita. Tienen buena resistencia y tienen una resistencia más alta tanto a la corrosión como al agrietamiento por esfuerzo corrosión, que los aceros austeníticos serie 300.²⁵

²² KALPAKJIAN, Serope; (2002); "*Manufactura, ingeniería y tecnología*"; Pearson Educación; México; pág. 148.

²³ KALPAKJIAN, Serope; (2002); "*Manufactura, ingeniería y tecnología*"; Pearson Educación; México; pág. 148.

²⁴ KALPAKJIAN, Serope; (2002); "*Manufactura, ingeniería y tecnología*"; Pearson Educación; México; pág. 149.

²⁵ KALPAKJIAN, Serope; (2002); "*Manufactura, ingeniería y tecnología*"; Pearson Educación; México; pág. 149.

2.7 DESIGNACIÓN DE LOS ACEROS INOXIDABLES

Para los aceros inoxidable se usa el sistema AISI que utiliza un código de tres dígitos, a veces seguido de una o más letras.

El primer dígito da una pista de la clase de acero. Serie 2xx y 3xx corresponden a aceros austeníticos. La serie 4xx incluye los aceros ferríticos y martensíticos.

El segundo y tercer dígito no están relacionados a la composición ni sigue una secuencia. Las letras del sufijo pueden indicar la presencia de un elemento adicional o indicar alguna característica especial. (Tabla 2.1)

Tabla 2.1 Designación de los aceros inoxidable.²⁶

Sufijo AISI	Sufijo UNS	Descripción
xxxL	xxx01	bajo carbono < 0.03% evita SCC
xxxS	xxx08	bajo carbono < 0.08%
xxxN	xxx51	nitrógeno agregado mayor resistencia
xxxLN	xxx53	bajo C < 0.03% + N agregado
xxxF	xxx20	mayor S y P mejor mecanizado
xxxSe	xxx23	Selenio mejor mecanizado
xxxB	xxx15	Si agregado evita descamado
xxxH	xxx09	Mayor contenido de carbono
xxxCu	xxx30	Cobre agregado

Para los elementos aleantes en la designación de los aceros inoxidable se utiliza: L indica bajo carbono, N indica nitrógeno, Se indica selenio, H indica mayor cantidad de carbono para alta temperatura. Las letras del sufijo llevan asociadas un par de dígitos; terminales en el correspondiente número UNS.

Hay muchos aceros inoxidable que no están en el sistema AISI como los endurecibles por precipitación (clase PH) y la mayoría de los aceros dúplex. Un grupo importante de estos aceros se designa con nombres propios o simplemente por su UNS.²⁷

²⁶ TUBOCOBRE S. A.; (2008); "Boletín Técnico"; pág. 123.

²⁷ TUBOCOBRE S. A.; (2008); "Boletín Técnico"; pág. 124.

CAPÍTULO 3

ACEROS AL CARBONO

En toda la producción de aceros, más del 90% son aceros al carbono, entre los productos fabricados con este tipo de aceros, figuran máquinas, carrocerías de automóvil, la mayor parte de las estructuras de construcción, cascos de buques.

3.1 DEFINICIÓN

Si el acero tiene en su composición hierro y carbono, así como cierta cantidad de las llamadas impurezas constantes, o sea, de tales elementos como manganeso (hasta 0,7%), silicio (hasta 0,4%), azufre (hasta 0,06%), fósforo (hasta 0,07%), y gases, este acero se denomina acero al carbono²⁸

Al aumentar el porcentaje de carbono, también aumentamos la dureza y la resistencia de estos aceros, pero estamos afectando a la capacidad de soldadura de los mismos.

3.2 DIAGRAMA DE EQUILIBRIO HIERRO- CARBONO²⁹

En la figura 3.1, se representa el diagrama que generalmente se denomina hierro-carbono. En realidad, el carbono siempre está combinado con el hierro en forma de carburo de hierro (CFe_3 =cementita). Propiamente debiera asignarse el nombre de “diagrama hierro-carburo de hierro”.

En el eje de abscisas, que está a escala logarítmica, se representan las proporciones de carbono y carburo de hierro. En el eje de ordenadas se representan las temperaturas, en grados Celsius.

En el eje de abscisas existen cuatro puntos notables bien definidos:

1. El que limita el diagrama a la derecha y corresponde a la proporción 6,67% de carbono. Es el porcentaje máximo de carbono que puede contener una

²⁸ KUZMIN, B.A.; SAMOLOTSKY, A.I.; (1982); “*Metalurgia Y Metalografía De Materiales De Construcción*”; Editorial Mir; Rusia; pág.160

²⁹ TECNIPRESS INGENIEROS ED; (2002); “*Aceros Productos Y Derivados T.I*”; Págs.106-108

aleación, si se excede este porcentaje el carbono estará presente como grafito, y en consecuencia no constituye una aleación.

2. El punto (C) corresponde a la proporción de 4,3%C (64,5% cementita). A este punto se le denomina *eutéctico* y señala el punto de fusión más bajo (1130°C) de la aleación.

La línea ABCD señala el principio de la solidificación, mientras que la línea AHJECF determina el final de la solidificación. Ambas tienen en común el punto eutéctico (C).

Las aleaciones de 4,3%C solidifican en un solo constituyente, también denominado eutéctico, que es la ledeburita (52% cementita y 48% austenita de 1,76%C).

3. El punto (E) señala la solubilidad máxima del carburo de hierro en hierro gamma, o bien el punto de mayor contenido de carbono de la austenita. Corresponde a un contenido de 1,76% de carbono, equivalente al 25% de carburo de hierro.

Por otro lado, este punto, en el eje de las abscisas, divide las aleaciones hierro-carbono en dos campos: los aceros (0,03%C-1,76%C) y las fundiciones (1,76%C-6,67%C).

A la vista del diagrama, pueden definirse los aceros como aquellas aleaciones hierro-carbono que, a partir de las temperaturas marcadas por las líneas: (A3)=(GS) y (Acm)=(SE), al calentarlos se transforman íntegramente en austenita, y la austenita, al enfriarla rápidamente da un constituyente muy duro que se llama martensita.

4. El punto (S) denominado *eutectoide*, es análogo al (C), eutéctico. Se diferencian en que, en el eutéctico (C) se verifica un cambio de estado: líquido-sólido o sólido-líquido, mientras que en el eutectoide (S), aun cuando el acero permanece en la fase sólida, se produce una transformación en la constitución de la aleación.

En este punto (S), al enfriarse la masa de austenita de composición eutectoide, se transforma íntegramente en perlita que es el constituyente eutectoide.

5. Punto (J) señala la temperatura más alta, 1492°C, en que la austenita permanece estable. Se le llama peritético y suele considerarse como un punto eutéctico invertido. Su porcentaje es 0,18%C.
6. Punto (H), con 0,08%C equivalente a 1,5% de cementita, precisa el más alto porcentaje que el hierro delta puede contener en solución sólida.
7. Punto (P) indica el máximo contenido de carbono, 0,025%C, que puede disolver la ferrita.

Los tres últimos: (J), (H) y (P), tiene poco interés práctico.

Cerca del origen está señalado el punto que responde al contenido de carbono del 0,3%, en que a la aleación hierro-carbono se la empieza a llamar acero. Con un contenido inferior, al hierro se le considera como técnicamente puro.

En el eje de ordenadas se observa los puntos críticos siguientes:

1. (A_0)= 210°C, cambio magnético de la cementita. A temperaturas superiores, la cementita deja de ser magnética.
2. (A_1)= 723°C, límite de la perlita.
3. (A_2)= 768°C, cambio magnético de la ferrita. A más alta temperatura, la ferrita deja de ser magnética.
4. (A_3)= (línea SG), límite de la ferrita. Como se ve, la línea no es horizontal. El punto crítico varía entre 723°C y 910°C y depende del tanto por ciento de carbono.
5. (A_{cm}) = (línea SE), límite de la cementita. El punto crítico, por la misma causa que en el anterior, varía entre 723°C y 1130°C.
6. (Línea EF)= 1130°C, límite de la ledeburita.
7. (Línea AHJECF), expresa las temperaturas a que se termina la solidificación. Por debajo de ella todo el metal está sólido.
8. (Línea ABCD), determina el principio de la solidificación. Por encima de ella todo el metal permanece en estado líquido.

9. (A_4) = (HB), límite superior de la austenita.

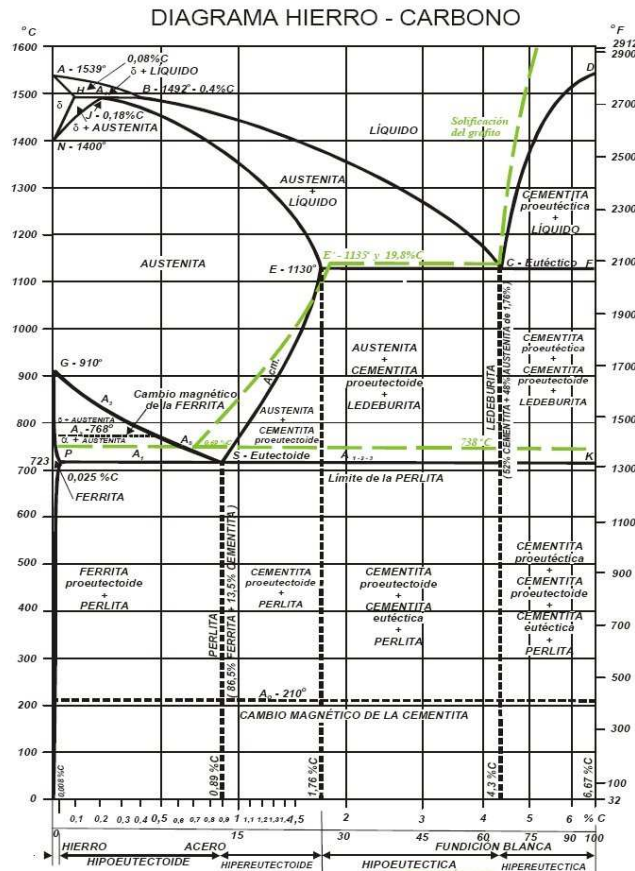


Figura 3.1 Diagrama de equilibrio Hierro-Carbono³⁰

3.3 DEFINICIÓN DE ESTRUCTURAS³¹

Los nombres de las estructuras que se tienen en el diagrama de equilibrio hierro-carbono han sido designados principalmente por su forma particular en cada caso, a continuación se describe las propiedades de cada estructura.

3.3.1 FERRITA

Es el hierro alfa. Prácticamente este constituyente está impurificado por silicio, fósforo, níquel, cromo, etc. La ferrita es el más blando y dúctil constituyente del acero.

³⁰ http://4.bp.blogspot.com/_ypQZyFOEYRA/SjKA7ekm8ul/AAAAAAAADbQ/Iu2eR-KNqhw/s1600-h/Diagrama+Fe-C.JPG

³¹ TECNIPRESS INGENIEROS ED; "ACEROS PRODUCTOS Y DERIVADOS" Tomo 1; págs. 103-105

Dureza: 90Br. Resistencia a rotura: 28kg/mm². Alargamiento, de 35 a 40 %. Es magnética.

3.3.2 CEMENTITA

Es carburo de hierro (CFe₃). Contiene 6,67% de carbono y el 93,33% de hierro. Es el constituyente más duro y frágil.

Dureza 700 Brinell (68 Rockwell C). Es magnética hasta los 210°C.

3.3.3 PERLITA

Este constituyente se compone del 86,5% de ferrita y el 13,5% de cementita (una parte de cementita por cada 6,4 partes de ferrita).

En cada grano alternan láminas o placas de cementita y ferrita. Se llama así, porque al iluminarla despide irisaciones parecidas a las de las perlas. Dureza: 200Br. Resistencia a rotura: 80kg/mm². Alargamiento 15%.

La estructura laminar se produce al enfriar lentamente. Si el enfriamiento es brusco, la estructura no es clara, se la llama sorbita o perlita sorbítica. Si a la perlita laminar se la mantiene algún tiempo a temperatura ligeramente inferior a la crítica (273°C), la cementita forma glóbulos que aparecen incrustados en la masa de ferrita. Entonces se la llama perlita globular.

3.3.4 AUSTENITA

Está formada por la disolución sólida de carburo de hierro en hierro gama. La proporción de carburo de hierro disuelto varía desde 0% al 25,5%, esto representa una proporción de carbono comprendida entre 0% y 1,76%. Este último porcentaje representa la solubilidad máxima, que se obtiene a la temperatura de 1300°C.

En los aceros aleados exclusivamente con carbono, la austenita se empieza a formar a los 723°C (ver punto crítico). A partir de la temperatura crítica superior (ver punto crítico), toda la masa de acero está formada por cristales de austenita. Si en estas condiciones la enfriamos rápidamente podemos obtener, a la

temperatura ambiente, una estructura austenítica. No obstante, esta estructura no es estable y con el tiempo se transforma en ferrita y perlita, o ferrita y cementita.

Dureza: 300Br. Resistencia a rotura: 100kg/mm². Alargamiento, de 30%.

La estructura de la austenita está formada por cristales de hierro gamma, cúbico, con átomos de hierro intercalados en las aristas y en el centro. Es el constituyente más denso.

3.3.5 LEDEBURITA

Por su contenido de carbono, 1,76%, señala el límite entre aceros y fundiciones. No es un constituyente de los aceros, sino de las fundiciones. El porcentaje de carburo de hierro aleado rebasa el 25%.

La ledeburita es una eutéctica, palabra ésta que se emplea para designar las mezclas de componentes que, sin segregación ni descomposición, pasan del estado sólido al líquido.

3.4 CLASIFICACIÓN

De acuerdo a su contenido de carbono, este tipo de aceros se clasifican en aceros de bajo, medio, alto y muy alto contenido en carbono.

3.4.1 ACEROS DE BAJO CONTENIDO EN CARBONO

Su porcentaje de carbono está entre el 0,05 y el 0,3%, estos aceros son tenaces, presentan una gran ductilidad y son fáciles de mecanizar, conformar y por su bajo contenido de carbono en sí, presentan una excelente soldabilidad. La mayoría de estos aceros no responden a tratamientos térmicos, salvo a los de endurecimiento superficial.

3.4.2 ACEROS DE MEDIO CONTENIDO EN CARBONO

Contienen entre el 0,3 y el 0,45% de carbono, las características que presentan estos aceros son: resistentes y duros, pero no se pueden trabajar o soldar con

tanta facilidad como los de bajo contenido de carbono. Admiten los tratamientos térmicos. Para obtener buenos resultados al soldarlos, deben utilizarse electrodos especiales y hay que tomar medidas para evitar la formación de fisuras en la zona de soldadura y sus inmediaciones. Estos aceros pueden ser tratados térmicamente mediante austenización, temple y revenido para mejorar sus propiedades mecánicas.

Las adiciones de cromo, níquel y molibdeno mejoran la capacidad de estas aleaciones para ser tratados térmicamente, generando así gran variedad de combinaciones resistencia-ductilidad. Estos aceros tratados térmicamente son más resistentes que los aceros bajos en carbono, pero menos dúctiles y tenaces. Se utilizan para fabricar ruedas de trenes, engranajes, cigüeñales y otros componentes estructurales que necesitan alta resistencia mecánica, resistencia al desgaste y tenacidad.

3.4.3 ACEROS CON ALTO O MUY ALTO CONTENIDO EN CARBONO

Los primeros contienen entre el 0,45 y el 0,75% de carbono, y los segundos, desde el 0,75 al 1,7% de carbono. Tanto unos como otros, responden muy bien a los tratamientos térmicos. Requieren el empleo de electrodos especiales, precalentamientos y tratamientos para eliminación de tensiones. Normalmente no se practica la soldadura en los aceros de muy alto contenido de carbono.³²

3.5 ELEMENTOS ALEANTES

Los elementos ordinariamente empleados son, por orden de importancia decreciente, manganeso, molibdeno, cromo, silicio y níquel, de la misma manera elementos como el vanadio en pequeñas proporciones resultan muy efectivos, de la misma manera el boro es sumamente importante en aceros con menos del 0,65% de carbono.

En forma de carburos, el cromo, molibdeno, manganeso, wolframio y vanadio, combinados con el carbono, forman carburos metálicos muy duros, más aún que

³² GIACHINO, J.W.; WEEKS, W; (2007); "Técnica Y Práctica De La Soldadura"; Reverté; España; Pág. 31.

la martensita, lo que estos carburos pueden reducir la soldabilidad de estos aceros notoriamente.

3.5.1 MANGANESO

Está presente en la mayoría de los aceros ordinarios al carbono para combinarse con el azufre y formar sulfuros de manganeso blandos. Así se impide la formación de sulfuros de hierro en los bordes de grano, lo cual produciría fragilidad. El azufre no suele ser deseable en el acero, por estos efectos fragilizadores del sulfuro de hierro, pero en forma de sulfuro de manganeso, el azufre no es perjudicial, siempre y cuando los sulfuros no estén presentes en grandes cantidades y se hallen bien dispersos, mejorando la mecanización de los aceros.

3.5.2 NÍQUEL

Se añade principalmente porque aumenta la tenacidad y la resiliencia, especialmente a baja temperatura. Además disminuye las deformaciones de temple, mejora la resistencia a la corrosión, rebaja las temperaturas críticas y ensancha la gama de temperaturas de tratamiento térmico, facilitando éste. En aceros de bajo contenido de carbono proporciona una buena resistencia a la corrosión, si se emplea en proporciones del 12 al 20%. Por su elevado costo, el níquel debe únicamente emplearse cuando no tenga sustituto.

3.5.3 CROMO

Este elemento en grandes porcentajes ofrece resistencias a la corrosión y al calor, pero en las proporciones que se emplean en los aceros al carbono estos efectos son muy leves. Muchas veces se utiliza combinado con níquel en una proporción de una parte de cromo por cada dos de níquel. Es frecuente que los carburos de cromo sean deseables por su mayor resistencia al desgaste.

3.5.4 MOLIBDENO

Mejora la templabilidad y aumenta las características mecánicas, especialmente en condiciones dinámicas y de temperatura. Tiende a formar carburos estables persistentes a temperaturas elevadas y, por ello, a conservar un tamaño de grano fino y una tenacidad no deseada.

3.5.5 VANADIO

Es otro aleante que forma carburos fuertes persistentes a alta temperatura. Estos carburos no entran fácilmente en solución cuando el metal se calienta durante el temple y, por ello, impiden el crecimiento del grano. El efecto de contener vanadio es una elevación de las características mecánicas, especialmente el límite elástico y la resiliencia, casi sin pérdida de ductilidad.

3.5.6 WOLFRAMIO

Es más eficaz que el molibdeno para conseguir dureza a temperaturas muy altas, ello es atribuible a carburos estables.

3.5.7 SILICIO

En pequeñas proporciones ejerce un efecto muy parecido al del níquel, aumentando las características mecánicas, particularmente el límite elástico, con escasa pérdida de ductilidad.

3.5.8 BORO

Es un poderoso agente favorecedor del temple, de unas 250 a 750 veces más eficaz que el níquel, de 75 a 125 veces más que el molibdeno y de unas 100 veces más que el cromo. Sólo unas pocas milésimas por ciento bastan para producir los efectos deseados en los aceros de bajo contenido de carbono, pero los resultados disminuyen rápidamente conforme aumenta el contenido de

carbono. Como no constituye carburo ni fuerza la ferrita cuando se emplea boro, en lugar de otros agentes mejoradores de la templabilidad, suelen conseguirse mejores condiciones para conformado en frío y mecanizado.³³

3.6 DESIGNACIÓN

Como la microestructura del acero determina la mayoría de sus propiedades y aquella está determinada por el tratamiento y la composición química; uno de los sistemas más generalizados en la nomenclatura de los aceros es el que está basado en su composición química.

En el sistema SAE/AISI, los aceros se designan con cuatro dígitos XXXX. Los dos primeros dígitos indican el contenido en aleantes y los dos últimos la concentración de carbono.

Para aceros al carbono el primer dígito es 1. Los aceros al carbono corrientes se designan 10XX (ejemplo 1045 es acero al carbono con 0.45% de carbono).

En la tabla 3.1 se presenta la descripción de los aceros al carbono según la designación SAE/AISI.

Tabla 3.1 Designación SAE/AISI para Aceros al Carbono³⁴

ACEROS AL CARBONO	DESCRIPCIÓN
10XX	No-resulfurado, 1.00 Mn máx.
11XX	Resulfurado
12XX	Resulfurado y refosforizado
15XX	No-resulfurado, sobre 1.00 Mn máx.

³³ DEGARMO, P; (1994); *"Materiales y Procesos de Fabricación"*; Editorial Reverté; España; págs. 196-199

³⁴ TUBOCOBRE S. A.; (2008); *"Boletín Técnico"*; pág. 125.

CAPÍTULO 4

PROCESO DE SOLDADURA GTAW

4.1 INTRODUCCIÓN

Es el primer proceso con protección gaseosa, llamado también HELIARC, denominado así por causa que el primer gas de protección fue el Helio, en principio se utilizaba con CC, se fue optimizando al utilizarlo con CA, y posteriormente con la implementación de las unidades de alta frecuencia con lo cual se logró mayor estabilidad del arco así como la posibilidad de soldar metales con alta conductividad térmica y de reducidos espesores. Ya para el comienzo de la década de los 40's, se consolidó el uso del Argón como gas protector del arco.

Entre los años 1938 - 1940, se descubrió que por causa de las altas temperaturas del centro del arco, los elementos del recubrimiento (fundente) al descomponerse atómicamente; producían CO₂; de tal manera que resulto en un gas de excelentes cualidades como agente protector del arco.

El proceso GTAW se consolido en la producción de soldaduras sobre metales muy reactivos, y de limitados espesores; de tal manera que aún existía una falencia en cuanto a procesos productivos, es por esto que para el año 1948 se creó el proceso GMAW partiendo del anterior; al imitar el Wolframio con un electrodo de alambre continuo.

Este proceso fue desarrollado inicialmente con el propósito de soldar metales anticorrosivos y otros metales difíciles de soldar, no obstante al pasar del tiempo, su aplicación se ha ido expandiendo a todos los metales usados comercialmente.

4.2 FUNDAMENTO DEL PROCESO

La soldadura GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) o también llamada TIG (Tungsten Inert Gas) es un proceso que usa un arco sostenido entre un electrodo no consumible de tungsteno y el charco de soldadura. El arco, electrodo y área que rodea al baño de fusión es protegido de la atmosfera por un gas inerte, y la adición de metal de aporte (opcional) se realiza mediante la fusión de una varilla de aporte desde un lado del baño de fusión.

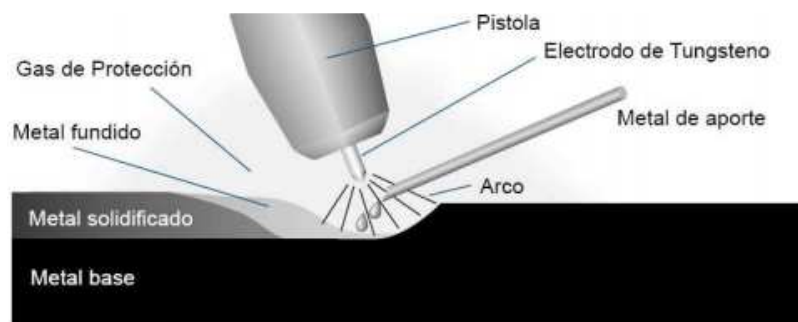


Figura 4.1 Diagrama Esquemático del Proceso de Soldadura GTAW³⁵

El arco eléctrico es producido por el paso de la corriente a través del gas de protección ionizado, que conduce la electricidad, este arco se establece entre la punta del electrodo de tungsteno no consumible y la superficie de 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 a soldar. Si el caso lo amerita se usa varilla de aporte, la cual se alimenta por el borde delantero del charco de soldadura. (Ver fig. 4.1).

4.3 CARACTERÍSTICAS Y VENTAJAS DEL PROCESO

- Soldaduras de buena calidad, generalmente sin defectos.
- Libre de salpicaduras.

³⁵ www.drweld.com

- Pueden usarse con o sin material de aporte.
- Ofrece un buen control para el pase de raíz.
- Pueden soldarse la mayoría de metales usados en la industria, incluso si son disímiles.
- No requiere fundente, por tanto no hay riesgo de inclusiones en la soldadura y no hay necesidad de limpieza final.
- Se puede soldar en todas las posiciones.
- Al igual que todos los sistemas de soldadura con protección gaseosa, el área de soldadura es claramente visible.
- Puede realizarse tanto de forma manual como automática.
- Permite soldar con mayor facilidad, espesores delgados.
- El calor del arco es más concentrado, por lo cual hay menos distorsión y mayor facilidad de la soldadura en los metales con alta conductividad térmica.

4.4 DESVENTAJAS DEL PROCESO

- Alto costo del equipo.
- Distancia limitada entre el equipo y el material del trabajo.
- Dificultades para trabajar al aire libre.
- Limitación en lugares de difícil acceso para la pistola.
- Las tasas de deposición son más bajas que en otros procesos.
- Requiere mayor destreza y coordinación en la soldadura manual.

4.5 TIPO DE CORRIENTE

La fuente de poder para GTAW puede ser AC o DC, sin embargo, algunas características sobresalientes obtenidas con cada tipo, hacen a cada tipo de corriente mejor adaptable para ciertas aplicaciones específicas.

El tipo de corriente utilizada depende del tipo de material a soldar. Normalmente la AC se emplea para soldar aluminio o magnesio y la DC se emplea para los materiales ferrosos.

4.5.1 CORRIENTE ALTERNA

Cuando se utiliza este tipo de corriente, es necesario usar una unidad de alta frecuencia, la cual puede estar construida del mismo equipo o como un dispositivo aparte que se conecta a la fuente de corriente alterna para poder soldar.

La corriente de alta frecuencia se emplea especialmente para soldar Aluminio y Magnesio, ya que permite que la corriente salte entre el electrodo y la pieza, perforando la película de óxido que se forma en la superficie de estos metales, abriendo una senda para que siga la corriente de soldadura. La superposición de esta corriente de alto voltaje y alta frecuencia es la corriente no solo tiene como ventaja que el arco se forma sin que el electrodo toque el material, sino que también el arco sea más estable, electrodos con más duración, mantener el arco por más tiempo.

4.5.2 CORRIENTE CONTINUA

Al efectuar la soldadura con corriente continua, el terminal positivo (+) se desarrolla el 70% del calor y el negativo (-) el 30% restante. Esto significa que según la polaridad asignada directa o inversa, los resultados obtenidos serán muy diferentes.

4.5.2.1 Corriente continua polaridad inversa

Con este tipo de polaridad, el 70% del calor se concentra en el electrodo de tungsteno y el 30% restante en el metal base. Produce soldaduras mucho más anchas y menos profundas que la de polaridad directa. Además realizan una fuerte limpieza. Debido a la alta aportación de calor al electrodo de tungsteno, se requiere uno de mayor tamaño. La aportación de calor más baja a estos metales y

la fuerte limpieza hacen de ella una buena elección para metales finos y muy oxidados. Dado que el metal que se va a soldar no emite electrones tan libremente como el tungsteno, el arco puede desviarse o ser algo errático.

4.5.2.2 Corriente continua polaridad directa

Aquí se concentra alrededor de dos tercios de calor de soldadura en la pieza y el tercio restante en el tungsteno. Una gran aportación de calor a la soldadura ocasiona una mayor fusión o una penetración más profunda en el metal base. Un nivel de calor más bajo en el tungsteno significa que se puede utilizar el electrodo de menor tamaño sin sobrecalentarlo. El electrodo de menor tamaño puede ahorrar tiempo, dinero y también tungsteno.

Se puede observar en la Figura 4.2, la diferencia entre los tipos de corriente cuando se trata de la distribución de calor y la penetración.

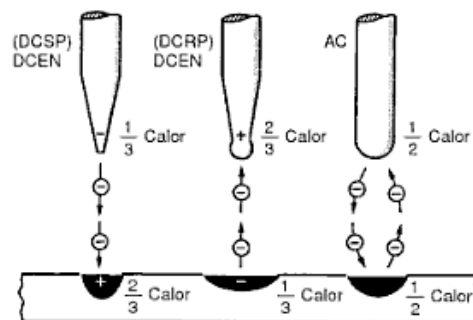


Figura 4.2 La distribución de calor entre el electrodo de tungsteno y el trabajo con cada tipo de corriente.³⁶

En la tabla 4.1 se presenta unos ejemplos de materiales con el tipo de corriente ideal para su caso y su alternativa.

³⁶ JEFFUS, Larry; (2005); "Manual Soldadura GTAW"; Editorial Nobel; España; pág. 2

Tabla 4.1 Tipo de corriente para diferentes materiales.³⁷

Material	Tipo de corriente ideal	Corriente opcional
Aluminio	Alterna de alta frecuencia	DC inversa
Latón y sus aleaciones	DC directa	Alterna de alta frecuencia
Cobre y sus aleaciones	DC directa	
Aceros de bajo carbono	DC directa	Alterna de alta frecuencia
Aceros inoxidables	DC directa	Alterna de alta frecuencia

4.6 EQUIPO

Para poder realizar soldaduras con GTAW se necesita básicamente (Fig. 4.3):

- Fuente de Poder
- Unidad de alta frecuencia (para AC)
- Pistola(Antorcha)
- Suministro gas de protección
- Suministro agua de enfriamiento (opcional)

**Figura 4.3** Equipo GTAW³⁸

La fuente de poder debe permitir un buen control de intensidades con valores bajos para asegurar la estabilidad del arco en trabajos con espesores delgados.

Para corriente alterna, la unidad de alta frecuencia se utiliza para estabilizar el arco y conseguir una circulación de corriente más uniforme.

³⁷ www.angelfire.com

³⁸ Soldaduras Zelecta S.A; (2008); *Catálogo soldadoras*; pág. 21

La pistola asegura el electrodo de tungsteno que conduce la corriente, el que está rodeado por una boquilla de cerámica que hace fluir concéntricamente el gas de protección.

El sistema para enfriamiento con agua se utiliza para intensidades de corriente superiores a 200 A. Para intensidades menores el enfriamiento se lo realiza con aire, así evitando el recalentamiento del mango. (Fig. 4.4).

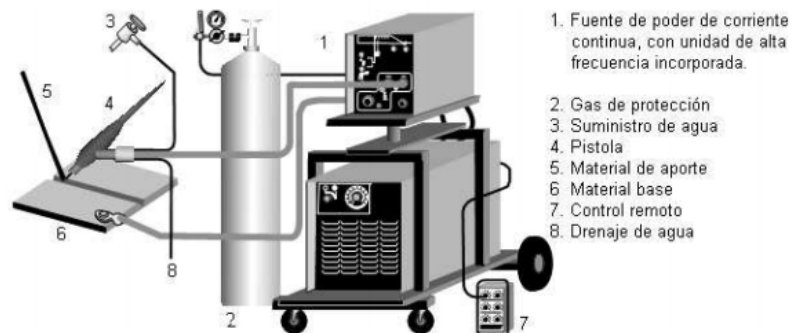


Figura 4.4 Esquema proceso GTAW³⁹

4.6.1 SOPLETES PARA GTAW

La mayoría de sopletes para proceso GTAW tienen los siguientes componentes:

- Cuerpo
- Tapa posterior
- Pinza y portapinza
- Boquilla
- Mango
- Juntas y aislantes diversos
- Difusor(lente para gas)



Figura 4.5 Soplete para GTAW⁴⁰

³⁹ TecnoSoud España s.l; (2010); "Catálogo"; pág. 24.

La cabeza o cuerpo del soplete es el principal componente del mismo. Todas las demás piezas se conectan a él. Su tamaño, diseño y capacidad de amperaje determinan si el soplete es de enfriamiento por aire o agua y su capacidad de soldadura.

La tapa posterior cumple dos propósitos importantes, se puede aflojar o apretar para fijar o liberar el electrodo de tungsteno y también cubre el extremo posterior del electrodo de tungsteno, protegiéndolo y sellando la parte superior de la cabeza de soldadura para evitar la fuga del gas protector.

En la pinza se aloja la varilla de tungsteno, y el portapinza sirve como difusor de gas y para acoplar la boquilla, dispone de varios agujeros en él para suministrar un flujo de gas protector uniforme.

Las boquillas de soldadura se suministran con diferentes tamaños y materiales. El tamaño de la apertura, denominado orificio, y el extremo de la boquilla afectan o determinan la corriente de soldadura y a la accesibilidad en espacios limitados. Los principiantes encontrarán a menudo más fácil utilizar una boquilla más pequeña para tener una mejor visibilidad. Sin embargo, se necesitan diámetros más grandes de boquillas para una cobertura adecuada del gas protector.

El mango debe brindar la mayor comodidad al soldador, por lo que generalmente tienen un lado plano para que el soldador sujete el soplete en la posición deseada.

Las juntas y aislantes tienen el propósito de proporcionar un sellado suave entre los componentes más rígidos como, por ejemplo, entre la boquilla y la cabeza del soplete. (Fig. 4.5).

El difusor reemplaza en la mayoría de casos al portapinzas, produce un flujo de gas muy liso y uniforme debido al gran número de aberturas pequeñas que tiene. Son componentes opcionales para este tipo de soldadura y su uso es recomendado en áreas con corrientes de aire donde la cobertura de gas protector está afectada.

⁴⁰ TecnoSoud España s.l; (2010); "Catálogo"; pág. 25.

4.7 ELECTRODOS

Los electrodos de tungsteno se convierten en una elección ideal para su uso como electrodo no consumible. Siendo estas propiedades las siguientes:

- Buen conductor eléctrico
- Temperatura de fusión muy alta
- Emite fácilmente el arco eléctrico
- Resistente a la oxidación(bajo condiciones normales)

Estas propiedades se pueden mejorar aún más seleccionando apropiadamente su tamaño y su forma final, y añadiendo otros elementos específicos. Las propiedades de este tipo de electrodo ayudan a la soldadura de la siguiente manera:

- Resistente a la oxidación. No se oxida en condiciones atmosféricas normales, lo que hace que el electrodo permanezca limpio por un largo periodo de tiempo mientras está almacenado.
- Al presentar una baja resistencia eléctrica, permite que la corriente de soldadura pase a través de él sin que llegue a calentarse debido por motivo de resistencia al paso de corriente.
- Es un buen emisor de electrones, lo que ayuda a establecer un arco liso mientras que los electrones que componen el arco avanzan por la abertura hacia la pieza.
- Alta temperatura de fusión (3410°C), y punto de ebullición ligeramente inferior a la temperatura del arco, lo cual significa que, durante el proceso de soldadura, solo pequeñas cantidades de tungsteno de la superficie del electrodo pueden realmente hervir y transferirse por el arco.

4.7.1 CLASIFICACIÓN

Los electrodos de tungsteno no consumibles para el proceso GTAW, están disponibles siguiendo la clasificación American Welding Society (AWS A.5.12) que se presenta a continuación.

- Tungsteno puro (EWP).

- Tungsteno con 1% de torio (EWTh-1).
- Tungsteno con 2% de torio (EWTh-2).
- Tungsteno con 0,25% a 0,5% de Zirconio (EWZr).
- Tungsteno con 2% de cerio (EWCe-2).
- Tungsteno con 1% de Lantano (EWLa-1).
- Aleaciones no especificadas o designadas (EWG).

Los diferentes tipos de electrodos se identifican por un código de color estandarizado. El extremo de cada electrodo se marca con el color apropiado. La marca de color se hace de tal forma que no aumente el diámetro, porque podría inferir con los contactos mecánicos entre el tungsteno y la pinza durante la utilización. (Ver Tabla 4.2).

Tabla 4.2 Designación AWS A.5.12 para electrodos de Tungsteno⁴¹

AWS	Color	Elemento aleante	Óxido aleante	% en peso
EWP	Verde	---		
EWCe-2	Naranja	Cerio	CeO ₂	2,00
EWLa-1	Negro	Lantano	La ₂ O ₃	1,00
EWTh-1	Amarillo	Torio	ThO ₂	1,00
EWTh-2	Rojo			2,00
EWZr-1	Café	Zirconio	ZrO ₂	0,25-0,50
EWG	Gris	No especificado	---	

La AWS ha establecido un sistema de identificación estándar para los electrodos de tungsteno.

E: Electrodo

W: Tungsteno (Wolframio)

P: denota el tungsteno puro sin elementos de aleación.

G: aleaciones que no se han establecido.

- La última letra o últimas letras se refieren a la aleación u óxido que se ha añadido al tungsteno.

⁴¹ JEFFUS, Larry; (2005); "Manual Soldadura GTAW"; Editorial Nobel; España; pág. 25

4.7.2 FORMAS DEL EXTREMO DEL ELECTRODO

Los extremos de los electrodos inicialmente no tienen una forma adecuada para la soldadura (no tienen forma). Por eso, antes de ser usados se les debe dar forma ya sea por mecanizado, desbaste o fundiéndolos.

Las tres formas se corresponden con los tipos de corriente de soldadura específicos. Estas formas y corrientes son: punta afilada para CCEN, extremo redondeado para AC y afilado con un pequeño extremo redondeado para CCEP (fig. 4.6).



Figura 4. 6 Formas posibles para electrodos de tungsteno.⁴²

- Punta afilada. Se utiliza para CCEN (DC-), el ángulo de la punta efectuará la penetración del cordón de la soldadura. Una reducción más larga que lo normal (3 veces el diámetro del electrodo) producirá cordones de soldadura anchos con penetración menos profunda.
- Extremo redondo. Se utiliza con AC, el radio de la punta del electrodo debe ser sólo un poco más grande que el de la varilla de tungsteno original. El extremo redondo permite soportar las temperaturas más altas generadas durante la fase CCEP (DC+) de la AC. El área mayor del extremo gastado también ofrece una estabilidad mejorada del arco para reavivarlo durante los ciclos AC. (Ver fig. 4.7).

⁴² . www.scribd.com

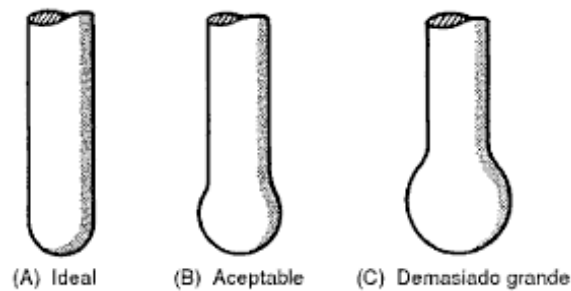


Figura 4. 7 Extremos redondos para electrodos de tungsteno.⁴³

- Afilado y redondo. Es una forma de electrodo un tanto inusual, y se utiliza con CCEP (DC+), este tipo de corriente tiene aproximadamente 2/3 del calor concentrado en el tungsteno. Esta forma de extremo permite al tungsteno soportar el nivel de calor sin que erosione excesivamente. Según aumenta la intensidad de corriente, aumenta el tamaño de la punta redondeada.

4.8 GASES PROTECTORES

Los gases inertes con más uso en este proceso son, el Helio y el Argón, el propósito del gas en este tipo de soldadura es proteger la misma y el electrodo contra la contaminación debido a la atmosfera ambiente. También se puede utilizar combinación de estos gases con otros como el Hidrógeno y Nitrógeno.

La pureza del gas protector es crítica para la calidad de la soldadura. El argón, por ejemplo. Se suministra con una pureza del 99,999%. Debido al alto nivel de pureza que se requiere para el gas protector, nunca se debe permitir que los gases no inertes, como O₂, CO₂ o nitrógeno, entren en contacto con el sistema del gas inerte, incluso cantidades muy pequeñas podrían afectar la calidad de la soldadura.

⁴³ JEFFUS, Larry; (2005); "Manual Soldadura GTAW"; Editorial Nobel; España; pág. 30

4.8.1 ARGÓN

Es un producto derivado de la producción de oxígeno en las plantas de separación de aire, es más pesado que el aire en una proporción de 1,4:1 y mucho más pesado que el helio en proporción 10:1, por lo que proporciona una buena protección.

Debido a su alto peso atómico, consigue una acción de limpieza más enérgica al chocar iones de mayor tamaño contra la capa de óxido, justificando de esta forma la utilización en la soldadura de aluminio.

Tiene bajo potencial de ionización, con lo cual se vuelve un fácil conductor, arco más estable, además presenta una baja conductividad térmica por lo que el calor se concentra en un arco estrecho y las soldaduras que se producen son estrechas y con gran penetración. La zona afectada por el calor es pequeña.

Es interesante su aplicación en la soldadura manual, ya que debido a las propiedades de bajo potencial de ionización y baja conductividad térmica hacen que el calor liberado en el arco sea poco sensible a la longitud del arco, y no se altere la forma del cordón.

El calor liberado por el arco es bajo, debido a que también lo es el potencial de ionización, por eso su aplicación resulta interesante para la soldadura de materiales de pequeños espesores.

Debido a la alta densidad, protege mejor que otro tipo de gas en todas las posiciones de soldadura, pero también esto puede tener una consecuencia en la posición sobrecabeza. En esta posición es probable que se necesiten caudales ligeramente mayores.

Se necesita un voltaje de arco más bajo, esta característica le hace a este gas apropiado para aplicaciones con corriente alterna.

4.8.2 HELIO

Es un gas inerte que también se puede obtener del aire, pero igualmente de yacimientos de gas natural.

Para obtener el mismo efecto protector que el Argón, es necesario utilizar caudales más elevados ya que este gas es más ligero que el Argón y el aire.

Potencial de ionización alto, y en consecuencia debe tener un voltaje de arco alto, por esta razón las soldaduras realizadas con este gas tiene mayor profundidad de penetración debido al mayor calor producido por el alto voltaje. Arcos menos estables, pero ideal para soldar espesores grandes.

Es efectiva con velocidades de soldadura altas, como las utilizadas para producir tubos.

El Helio es menos utilizado en soldadura manual, debido al cambio en el voltaje del arco por su longitud, además es utilizado solo en ciertas aplicaciones ya que el helio es más caro y se consumen caudales superiores a los de argón.

4.8.3 MEZCLAS DE GASES CON ARGÓN

Para aumentar el calor del arco, manteniendo las buenas propiedades del argón, se mezcla este con helio o hidrógeno. Así se consiguen arcos más calientes que permiten soldar a mayor velocidad o espesores más gruesos. (Tabla 4.3).

- Argón-helio. Se utilizan mezclas de estos dos gases en distintas proporciones, logrando aprovechar en cada caso las ventajas necesarias de cada uno. Algunos sistemas utilizan la mezcla sólo para iniciar el arco, y posteriormente usan helio puro, para aumentar la rapidez de la soldadura.
- Argón-hidrógeno. La mezcla empeora el cebado del arco, por lo que las proporciones de los gases de mezcla son pequeñas. El efecto reductor del hidrógeno contribuye a evitar la oxidación superficial. Sin embargo aumenta la reactividad del gas, pudiendo ocasionar defectos en ciertos materiales como porosidad o grietas. Se utiliza para soldadura de aceros inoxidables austeníticos y níquel y sus aleaciones y no se utiliza para aceros poco aleados, cobre, aluminio, o aleaciones de aluminio.

Tabla 4.3 Gases inertes para GTAW⁴⁴

MATERIAL	TIPO DE GAS
Aluminio y sus aleaciones	Argón
Latón y sus aleaciones	Helio o Argón
Cobre y sus aleaciones (menor de 3mm)	Argón
Cobre y sus aleaciones (mayor de 3mm)	Helio
Acero al carbono	Argón
Acero inoxidable	Argón

4.9 APLICACIONES

El proceso GTAW tiene aplicación en muchos campos de la industria actual dado la limpieza y calidad en las uniones y demás trabajos realizados, además de la gran variedad de metales que pueden ser soldados con este proceso. Se utiliza principalmente para soldar aluminio, y aceros inoxidables, donde lo más importante es una buena calidad de soldadura. Principalmente, es utilizada en unión de juntas de alta calidad en centrales nucleares, químicas, construcción aeronáutica, industria hospitalaria, reparaciones, e industria alimenticia.

⁴⁴ www.angelfire.com

CAPÍTULO 5

SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS INOXIDABLES Y ACEROS AL CARBONO.

5.1 SOLDABILIDAD⁴⁵

Se entiende por soldabilidad la facilidad con que un metal se puede conformar por soldadura de sus partes, así como la habilidad de unión soldada para resistir las condiciones de servicio. Existe la soldabilidad operatoria, la soldabilidad metalúrgica y la soldabilidad constructiva.

La soldabilidad operatoria es indispensable y determina que material pueda o no ser soldado.

La soldabilidad metalúrgica determina hasta qué punto pueden soldarse dos metales sin que su composición represente inconvenientes graves por fusión, oxidación, tratamiento térmico, etc.

La soldabilidad constructiva se refiere a la facilidad con que pueden unirse dos metales para lograr formas que resistan los esfuerzos a que van a ser sometidos, garantizando su duración.

5.2 SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS

En los aceros, el principal elemento que influye en la soldabilidad es el carbono y luego los otros elementos aleantes.

Existen aceros de Bajo, Medio y de Alto contenido de carbono, Aceros Aleados, Aceros para Herramientas, Aceros Inoxidables, Aceros HSLA, Aceros Estructurales, Aceros para Tuberías, etc.

⁴⁵ MOLERA, Pere; (1992); "Soldadura Industrial: clases y aplicaciones"; Productica; España; pág. 9.

5.2.1 SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS AL CARBONO

5.2.1.1 ACEROS DE BAJO CARBONO

Estos aceros poseen un concentración de carbono menor al 0.25% y un porcentaje de manganeso que va desde: 0.25-1.5%.

La designación de los mismos va desde el acero SAE 1005 al SAE 1025.

Tienen buena y excelente soldabilidad, y pueden soldarse por cualquiera de los procesos de soldadura al arco, de gas y de resistencia. Procesos como SMAW, GMAW, GTAW, FCAW, SAW, OAW, RSW, etc., pueden ser utilizados con estos aceros.

5.2.1.2 ACEROS DE MEDIO CARBONO

Estos aceros poseen un porcentaje de carbono que va desde 0.25 – 0,50, y un porcentaje de manganeso que va desde 0.6-1.65

Su designación va desde el acero SAE 1026 al SAE1050.

Tienen soldabilidad regular y requieren Precalentamiento que oscila entre 149 – 260°C para liberar las tensiones y reducir la dureza. Se pueden soldar con todos los procesos de soldadura.

5.2.1.3 ACEROS DE ALTO CARBONO

Estos aceros poseen un porcentaje de carbono que va desde 0.5 – 1.03, y un porcentaje de manganeso que va desde 0.3 -1

Su designación va desde el acero SAE 1056-1095

Tienen entre mala y regular soldabilidad y se debe tomar precauciones especiales cuando se sueldan. Requieren de precalentamiento que oscila entre 204 a 316°C y luego de soldar se especifica un postcalentamiento. Se sueldan con todos los procesos al arco.

5.2.2 SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS INOXIDABLES

5.2.2.1 Aceros inoxidable austenicos

Todos los aceros inoxidable austeníticos se pueden soldar con la mayoría de procesos de soldadura y ligeramente más difíciles de soldar que los aceros al carbono. El cromo está entre 16-24%, y el níquel entre 8 al 19%

Su designación va desde el AISI 201, 202, 301, 302, 304, 304L, 308, 309, 310, 312, 314, 314L, 316, 316L, 317, hasta 321.

5.2.2.2 Aceros inoxidable ferríticos

No son endurecibles por medio de tratamientos térmicos y son magnéticos.

Todos los tipos ferríticos se consideran soldables con la mayoría de procesos de soldadura excepto el AISI 430F.

No se recomiendan procesos de soldadura que tiendan a incrementar la captación de carbono como OAW, GMAW.

Se da precalentamiento hasta 200°C. El cromo va del 11 al 23%. Su designación va desde el AISI 405, 430, 430F, hasta el 446.

5.2.2.3 Aceros inoxidable martensíticos

Son endurecibles por medio de tratamientos térmicos y son magnéticos.

Se recomienda que la temperatura de precalentamiento sea entre 232 a 288°C.

Se debe dar poscalentamiento después de la soldadura entre 469 a 760°C, seguido por enfriamiento lento.

Son difíciles de soldar, y no se debe usar procesos que ayuden a captar el carbono. Su designación va del AISI 403, 410, 414, 416, 416Se, 431, hasta el 440.

5.3 DIAGRAMAS DE CONSTITUCION

Los diagramas de constitución ayudan a la predecir el comportamiento de la soldadura de los aceros inoxidable. La realización de estos diagramas ha tomado un esfuerzo considerable a los investigadores durante los últimos 75 años. Gran parte de este estudio ha sido enfocado a los efectos de composición en la microestructura de la soldadura.

5.3.1 DIAGRAMA DE SCHAEFFLER⁴⁶

Anton Schaeffler obtuvo su primer diagrama de manera empírica en el año de 1947, a partir del cual fue mejorando hasta obtener el hoy conocido como diagrama de Schaeffler y se muestra en la figura 5.1. Este diagrama permite determinar la estructura de un metal conociendo su composición y además ayuda a predecir la estructura del metal de soldadura obtenido.

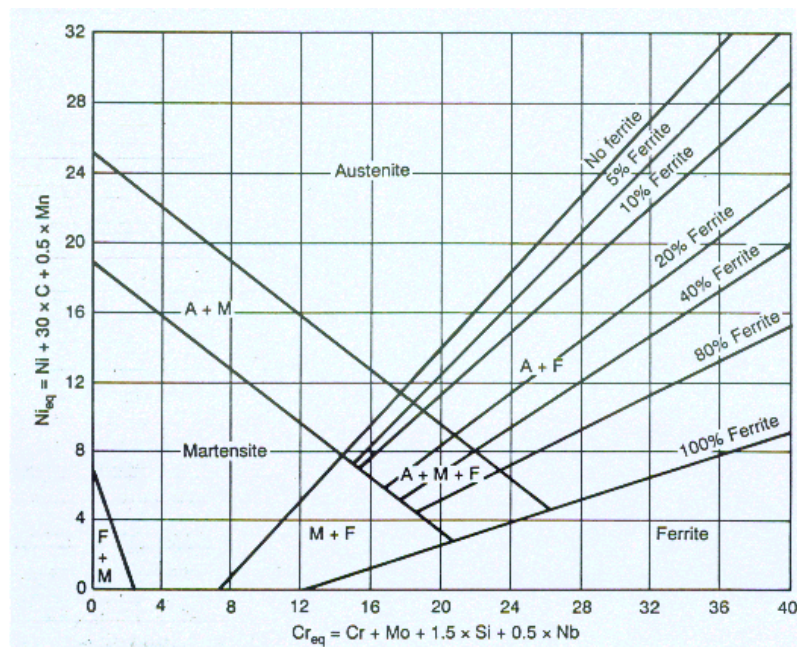


Figura 5.1 Diagrama de Schaeffler⁴⁷

⁴⁶ LIPPOLD, John; (2005); "Welding metallurgy and weldability of stainless steel"; Wiley Insterscience; EEUU; pág. 29.

⁴⁷ <http://www.bssa.org.uk/topics.php?article=121>

El diagrama de Schaeffler muestra el dominio de las fases ferrítica, martensítica y austenítica propias de los aceros inoxidable cuando son enfriados a las velocidades de soldadura.

5.3.2 DIAGRAMA DELONG⁴⁸

El diagrama DeLong mejorado se presenta en la figura 5.2; las mejoras realizadas al diagrama original mejora la habilidad para predecir la ferrita delta.

Pero el gran cambio que se realizó en el primer diagrama fue la creación de un número-escala de la ferrita (FN). Este término resulto de la dificultad que existía para cuantificar la cantidad de ferrita por volumen de acero inoxidable soldado.

Los valores del FN se basan en mediciones magnéticas, las cuales son posibles debido a que la ferrita delta tiene una estructura BCC y la austenita no.

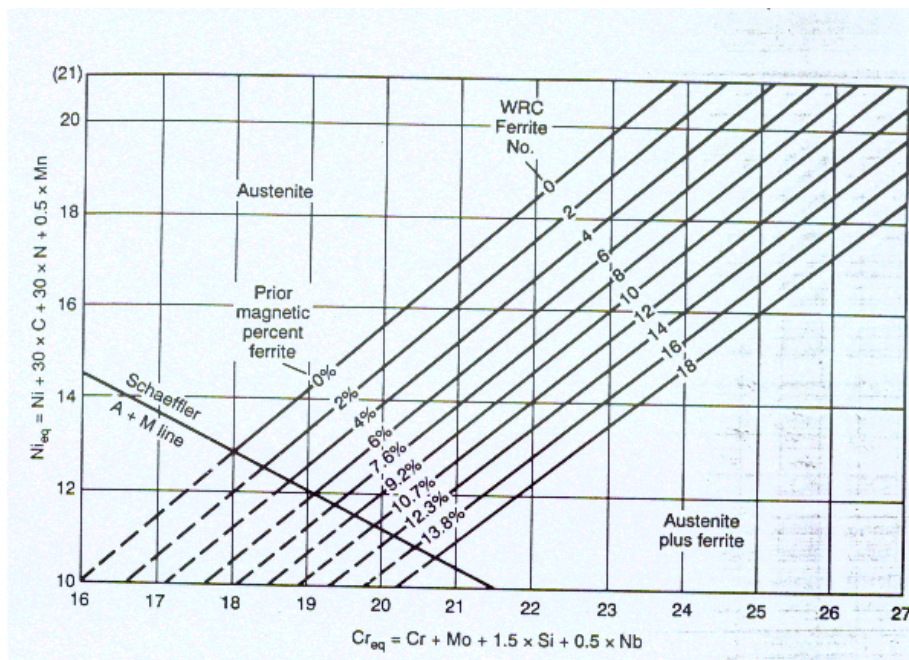


Figura 5. 2 Diagrama de DeLong⁴⁹

Las unidades FN no relacionan directamente el porcentaje de ferrita, sin embargo valores menores a 10 se consideran que tendrán un porcentaje de ferrita similar.

⁴⁸ LIPPOLD, John; (2005); "Welding metallurgy and weldability of stainless steel"; Wiley Insterscience; EEUU; pág. 31.

⁴⁹ <http://www.bssa.org.uk/topics.php?article=121>

En el año de 1973, el subcomité de investigación de la soldadura en aceros inoxidable adoptó el FN como medidor de la cantidad de ferrita, y los métodos de calibración está especificado en las normas AWS A4.2 e ISO 8249.

5.4 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA SOLDABILIDAD

Los factores que influyen en la soldabilidad de los materiales son:

- Tipo de material base
- Influencia de los elementos aleantes
- Tipo de junta y procesos de soldadura
- Velocidad de enfriamiento
- Energía suministrada
- Temperatura de precalentamiento
- Secuencia de la soldadura

5.4.1 MATERIAL BASE

Comúnmente denominado material base porque es sobre el cual se depositara la soldadura, el material base influye básicamente en la soldadura por su espesor o geometría y composición química.

De la geometría del material dependerá el tipo de junta con la que se realizará la soldadura, el proceso que va a ser utilizado y los parámetros que esta tendrá. Por otra parte de la composición química dependerá la influencia de los elementos aleantes.

5.4.1.1 Carbono equivalente

Las propiedades físicas y químicas de algunas aleaciones muy necesarias para la industria, son tales que con cualquier método de soldadura aparecerán grietas o fisuras que pueden estar en la zona afectada por el calor o en el cordón de soldadura, zonas de elevada fragilidad, poros; cuando aparecen estos defectos se dice que determinado material tiene mala soldabilidad. Las propiedades de las

aleaciones dependen de la cantidad de elementos aleantes, pero incluso los mejores de ellos no se pueden introducir ilimitadamente. El contenido de carbono, manganeso y toda una serie de otros elementos aleantes influye, en diferente grado sobre la soldabilidad de los aceros. Por eso su acción se compara con la influencia del carbono, reduciéndola al carbono equivalente.

El carbono equivalente se debe a que el carbono es el elemento que influye en mayor grado sobre la soldabilidad, como regla general en un acero al aumentar el contenido de carbono disminuye la soldabilidad, esto se debe a que al aumentar el contenido de carbono aumenta una propiedad de los aceros que se llama la templabilidad.

El término de carbono equivalente fue desarrollado como una fórmula para normalizar la composición química del acero en un solo número que indica como la composición química podría afectar el endurecimiento o templabilidad del material, lo que sirve para seleccionar la temperatura de precalentamiento más adecuada.

5.4.1.2 Fórmulas para calcular el carbono equivalente

Existen algunas fórmulas para calcular el carbono equivalente que han sido desarrolladas en base a experimentaciones, estas fórmulas se deben usar para tener una idea aproximada del comportamiento de los aceros en lo referente a su soldabilidad pero de ninguna manera esta predicción es exacta ya que la soldabilidad de los aceros depende de varios factores y no solo de su composición química.⁵⁰

⁵⁰ LAUFGANG, Sergio; (2002); "Curso De Inspectores De Soldadura"; pág. 30.

Tabla 5. 1 Fórmulas para el cálculo del carbono equivalente⁵¹

AUTOR		FÓRMULA*
1	Structural Welding Code AWS D1.1	$CE = C + \frac{(Mn + Si)}{6} + \frac{(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15}$
2	Ito y Bessyo	$CE = C + \frac{Si}{30} + \frac{(Mn + Cu + Cr)}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$
3	Ginzburg	$CE = C + \frac{Mn}{30} + \frac{(Cr + Mo + Zr)}{10} + \frac{Ti}{2} + \frac{Nb}{3} + \frac{V}{7} + \frac{\sigma_t}{900} + \frac{h}{20}$
4	International Institute of Welding	$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Mo + Cr + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15}$
5	Yurioka – Ohshita “CEN”	$CEN = C + A(C)x \left[\frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{20} + \left(\frac{Cr + Mo + Nb + V}{5} \right) + 5B \right]$ $A(C) = 0,75 + 0,25 \tanh[20(C - 0,12)]$
6	Koch - Bersch	$CE = C + \frac{(Mn + Mo + Ni + Cr + V + Cu + Si)}{20}$
7	Stout	$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cu}{40} + \frac{(Mo + Cr)}{10}$
8	Bradstreet	$CE = C + \frac{Mn}{20} + \frac{Ni}{15} + \frac{(Mo + Cr + V)}{10}$
9	Graville	$CE = C + \frac{Mn}{16} + \frac{Ni}{50} + \frac{Cr}{23} + \frac{Mo}{7} + \frac{Nb}{8} + \frac{V}{9}$
10	Kihara – Suzuki - Tamura	$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Mo}{4} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{V}{14} + \frac{Si}{24}$

*: Cantidades en porcentaje en peso.

⁵¹ LAUFGANG, Sergio; (2002); “Curso De Inspectores De Soldadura”; pág. 31.

De las formulas listadas en la tabla 5.1, las fórmulas 4 a 10 son aceptables para aceros al carbono; sin embargo las formulas 1 y 4 son aplicables a aceros inoxidables ya que incluyen los aleantes presentes en este tipo de aceros.⁵²

La tabla 5.2 muestra la soldabilidad en función de los rangos de los valores del carbono equivalente:

Tabla 5. 2 Soldabilidad como función del carbono equivalente⁵³

Carbono equivalente CE	Soldabilidad
Inferior a 0,35	Excelente
De 0,36 a 0,40	Muy buena
De 0,41 a 0,45	Buena
De 0,46 a 0,50	Deficiente
Superior a 0,50	Mala

5.4.2 TEMPERATURA DE PRECALENTAMIENTO

La temperatura de precalentamiento debe ser la correcta para que el proceso de precalentamiento sea efectivo. Los métodos existentes para determinar la temperatura de precalentamiento consideran los factores que influyen en el fisuramiento en frío: composición química del acero, difusión de Hidrógeno, calor aportado, espesor del metal base, tensiones residuales en la soldadura y restricción de la junta.

Los métodos para el cálculo de la temperatura de precalentamiento son los siguientes:

- British standard 5135-74
- Nomograma de COE
- Criterio de duren
- Criterio de ITO y BESSYO
- Criterio propuesto por SUZUKI
- Criterio de SUZUKI y YURIOKA

⁵² GINZBURG, Vladimir.; (2005); "Metallurgical Design Of Flat Rolled Steels", Marcel Dekker; EEUU; pág. 215.

⁵³ GINZBURG, Vladimir.; (2005); "Metallurgical Design Of Flat Rolled Steels", Marcel Dekker; EEUU; pág. 215.

- Método de SEFERIAN
- Método del instituto internacional de soldadura
- Método del control de la temperatura
- ANSI/AWS D1.1 código de estructuras soldadas en acero
- Método de la carta

El control de la temperatura de precalentamiento puede realizarse de las siguientes maneras:⁵⁴

- Mediante el empleo de Termocuplas o Pirómetros ópticos.
- Utilizando lápices o líquidos comerciales que funden o cambian de color a temperaturas determinadas, especificadas por el fabricante.

5.4.2.1 Criterio de Duren

El criterio de Duren es un método desarrollado sobre aceros al carbono – cromo, mediante ensayos de implante y utilizando diversos electrodos.

Duren desarrollo una fórmula de carbono equivalente en donde considera la composición química del acero y la velocidad de enfriamiento del material de aporte entre los 800 y 500 °C ($t_{g/5}$).

$$CE_{t_{g/5}} = C + \frac{0,3}{(1 - 0,5lgt_{g/5})} \left(\frac{Si}{11} + \frac{Mn}{8} + \frac{Cu}{9} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{17} + \frac{Mo}{6} + \frac{V}{3} \right)$$

El método se adopta para la expresión del carbono equivalente un tiempo de enfriamiento estimado de 2 a 6 segundos, quedando la expresión de la siguiente manera:

$$CE_{2-6} = C + \frac{Si}{25} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Cr}{10} + \frac{Ni}{40} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10}$$

⁵⁴ GIACHINO, Joseph; WEEKS, William; (1981); "Técnica Y Práctica De La Soldadura"; Reverté; Espana; pág. 131.

El criterio de Duren determina la temperatura de precalentamiento mediante una fórmula en función del carbono equivalente y cantidad de hidrógeno depositado por el electrodo, como se indica en la tabla 5.3.

Tabla 5. 3 Temperatura de precalentamiento en función del CE y el contenido de Hidrógeno⁵⁵

Proceso de soldadura	Contenido de hidrógeno [ml/100g]	$T_p = F(CE_{2-6})$
Electrodo celulósico	40	$T_p = 416 \log(100CE_{2-6}) - 456$ $T_p = 678CE_{2-6} - 52$
Electrodo básico	10	$T_p = 490 \log(100CE_{2-6}) - 596$ $T_p = 739CE_{2-6} - 104$
Electrodo básico	5	$T_p = 597 \log(100CE_{2-6}) - 784$ $T_p = 826CE_{2-6} - 158$
Protección gaseosa	3	$T_p = 764 \log(100CE_{2-6}) - 1064$ $T_p = 994CE_{2-6} - 233$

5.4.2.2 Criterio de Ito y Bessyo

El criterio de Ito y Bessyo adiciona a la fórmula del carbono equivalente factores que por lo general no son tomados en cuenta en otras fórmulas del carbono equivalente que solo toma en cuenta la composición química, los factores adicionales son:

- Nivel de hidrógeno
- Grado de restricción
- Espesor de la junta

Al agregar estos factores a la fórmula del carbono equivalente el nuevo término se llama Parámetro de Composición Pcm.

$$Pcm = C + \frac{Si}{30} + \frac{(Mn + Cu + Cr)}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B + \frac{H}{60} + \frac{A * t}{600}$$

Donde:

⁵⁵ QUESADA, J.; ZALAZAR, M.; (2004); "Métodos Para Calcular El Precalentamiento De Uniones Soldadas"; La Serena; Chile; pág. 110.

H.- Es la cantidad de Hidrógeno disuelto en el metal depositado en (cm³ / 100g de metal depositado)

H = 5 Para electrodos de extra bajo hidrógeno

H = 6 Para electrodos de bajo Hidrógeno

H ≥ 25 Para electrodos rutilicos / celulósicos

A.- Grado de restricción

A = 1 para juntas libres

A = 2 para juntas restringidas

t.- Es el espesor de la junta en mm

Con estos valores la Temperatura de PC se calcula con la siguiente fórmula:

$$TPC[C^{\circ}] = 1440 Pcm - 392$$

5.4.2.3 Criterio propuesto por Suzuki

El criterio propuesto por Suzuki, consiste en aplicar una fórmula donde se calcula directamente la temperatura de precalentamiento, la formula considera factores como: la composición química del material, el espesor y la cantidad de hidrógeno depositado por el electrodo.

La fórmula aplicada en el criterio de Suzuki fue desarrollada en base a ensayos bajo la norma JIS-Y en donde se realizaba un cordón de prueba con un rango de calores de aporte entre 6 y 30 KJ/cm; la fórmula a aplicar es la siguiente.

$$Tp[{}^{\circ}C] = 58 \lg h + 98 \lg H_D - 316 + 1108 \left(C + \frac{Si}{15} + \frac{Mn}{18} + \frac{Cu}{22} + \frac{Ni}{58} + \frac{Cr}{17} + \frac{Mo}{19} + \frac{V}{6} + 6B \right)$$

Donde:

h = espesor del material

H_D = Contenido de hidrógeno en 100 gr de metal depositado (ml/100 gr).

5.4.2.4 Criterio de Suzuki y Yurioka

El criterio de Suzuki y Yurioka determina la temperatura de precalentamiento, mediante una fórmula desarrollada en base a ensayos Tekken bajo la norma JIS en aceros utilizados en la construcción de tuberías que requieran alta resistencia. La fórmula desarrollada por Suzuki y Yurioka es la siguiente:

$$(t_{100})_{cr} = -1527 - 0,0653K\sigma_Y + (2134 + 0,983K\sigma_Y)CEN + 700lgH_D$$

Donde:

σ_Y = Tensión de fluencia del metal (MPa).

K = Relación de concentración de tensión próxima a la raíz de soldadura.

H_D = Contenido de hidrógeno por cada 100 gr de metal depositado por el procedimiento de la norma JISZ 3113 (ml/100 gr).

CEN = Carbono equivalente

$$CEN = C + A(C) \left\{ \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr+Mo+Nb+V}{5} + 5B \right\}$$

$$A(C) = 0,75 + 0,25 \tanh\{20(C - 0,12)\}$$

t_{100} = tiempo de enfriamiento (segundos), es la duración hasta el momento en que una soldadura se enfría por debajo de los 100 °C.

Para una soldadura libre de fisuras el criterio establece que el tiempo de enfriamiento por debajo de los 100 °C, tiene que ser mayor a un tiempo de enfriamiento crítico, que viene tabulado de acuerdo al material que se quiera soldar.

$$t_{100} > (t_{100})_{cr}$$

5.4.2.5 Método de Seferian

El método de Seferian determina la temperatura de precalentamiento de dos maneras, ya sea utilizando una fórmula que calcula directamente la temperatura de precalentamiento o mediante el uso de una gráfica; cabe destacar que en este método solo se toma en cuenta la composición química del metal base y el espesor del mismo.

La fórmula desarrollada por Seferian es la siguiente:

$$T_p [^{\circ}\text{C}] = 350 \sqrt{C_T - 0,25}$$

Donde:

T_p = Temperatura de precalentamiento

C_T = Equivalente total del carbono

$$C_T = C_q + C_e = C_q(1+0,005e)$$

$$C_q [\%] = C + \frac{Mn + Cr}{9} + \frac{Ni}{18} + \frac{7Mo}{90}$$

C_q = Equivalente químico

C_e = Equivalente en carbono del espesor

e = espesor (mm)

La gráfica desarrollada por Seferian para determinar la temperatura de precalentamiento se muestra en la figura 5.3:

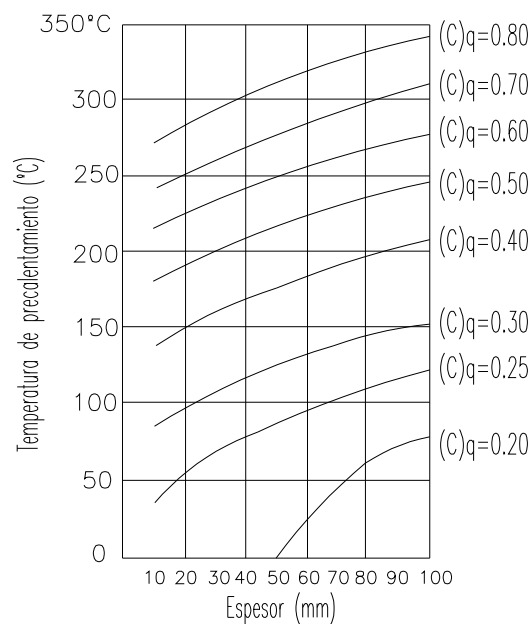


Figura 5. 3 Gráfico de Seferian⁵⁶

⁵⁶ QUESADA, J.; ZALAZAR, M.; (2004); "Métodos Para Calcular El Precalentamiento De Uniones Soldadas"; La Serena; Chile; pág. 111.

5.4.2.6 Método del Instituto Internacional de Soldadura

En el método del Instituto Internacional de Soldadura (IIW) se utiliza una gráfica para determinar la temperatura mínima de precalentamiento y entre pasadas, la forma de utilizar la gráfica es con el valor del Índice de Brusquedad Térmica (IBT) que depende de la geometría de la junta soldada, el valor del calor aportado a la pieza a soldar y el carbono equivalente.

La figura 5.4 es utilizada para determinar la temperatura mínima de precalentamiento.

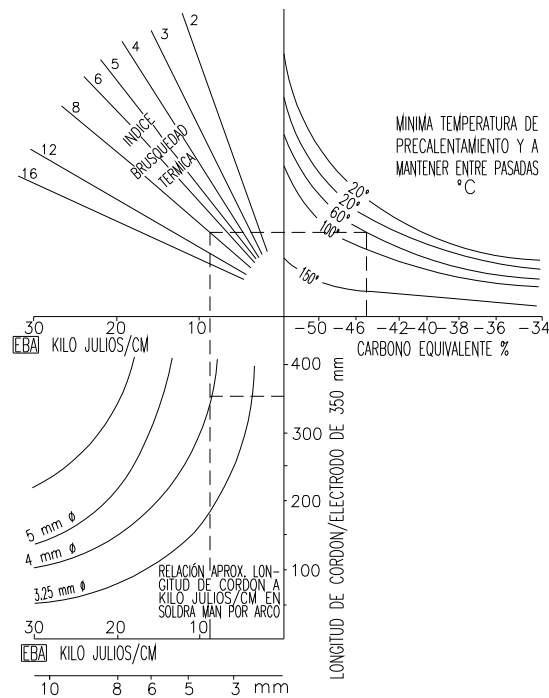


Figura 5. 4 Gráfica del IIW⁵⁷

5.5 ENSAYOS QUE DETERMINAN LA SOLDABILIDAD

Queda establecido que factores como la composición química, parámetros operacionales, procedimientos, grado de restricción, y ambiente (especialmente la presencia de hidrógeno), son factores que determinan la soldabilidad. De ellos,

⁵⁷ QUESADA, J.; ZALAZAR, M.; (2004); "Métodos Para Calcular El Pre calentamiento De Uniones Soldadas"; La Serena; Chile; pág. 113.

quizás el factor más importante es la composición química del metal. Pues, es un factor que a priori puede determinar si un metal es inherentemente soldable, difícil de soldar, o completamente no soldable.

Para evaluar la soldabilidad de un metal base o material de relleno, es primordial emplear una técnica que simule lo más cercano posible las condiciones que podrían estar presentes durante la fabricación, y en servicio. Esto significa, simular la configuración de la junta, el grado de restricción impuesto por el espesor del metal base, o la masa en general, y el grado de restricción impuesto por otras estructuras del conjunto soldado.

Debido a que los ensayos de soldabilidad son usados para evaluar las características de los metales base, varios de estos ensayos, más que destinados a la producción, son realizados como ensayos de laboratorio o con fines investigativos, es por esto que no necesariamente todos se encuentran cubiertos bajo reglamentos de instituciones oficiales de normalización. Aunque en gran cantidad estos ensayos son usados durante el desarrollo de nuevas aleaciones, muchos también son usados en investigaciones de soldadura con el fin de asegurar la soldabilidad de metales base, todo esto previo a la etapa de producción. Cada ensayo está diseñado para evaluar la susceptibilidad a un problema específico de soldabilidad.

Estos ensayos evalúan varias respuestas del metal base a diferentes condiciones reales o simuladas de soldadura, además proveen información sobre las aleaciones, procesos y procedimientos de soldadura. Los datos generados pueden ser comparados con los datos producidos bajo las mismas condiciones de ensayo pero en otras condiciones térmicas de material, o con datos producidos con otros procesos o procedimientos de soldadura.

Todos estos ensayos proveen información cualitativa que es usada para clasificar diferentes materiales, o condiciones térmicas de los mismos materiales, procesos, procedimientos, y ciclos térmicos. Ninguno de los ensayos de soldabilidad arroja información cuantitativa como límites de fluencia de una aleación específica cuando es ensayada bajo tracción.

Generalmente, los ensayos de soldabilidad pueden ser clasificados en dos amplias categorías:^{58; 59}

1. Ensayos directos de soldabilidad.- También llamados ensayos reales, hacen uso de una muestra de soldadura real o una zona entera de metal soldado realizado en el material previsto, reproduciendo lo más estrictamente posible procesos, parámetros operacionales, y condiciones de operación, así como las condiciones del metal base, geometría y dimensiones, y restricción.
2. Ensayos indirectos de soldabilidad.- Se los conoce también como ensayos simulados, pues, se los realiza simulando el ciclo térmico de una soldadura de modo que se crea una zona de soldadura simulada en términos de microestructura, de este modo se utilizan principios metalúrgicos básicos para examinar los parámetros de soldadura en la muestra.

A continuación se realiza una descripción que resume las particularidades de gran parte de estos ensayos:

5.5.1 ENSAYOS DIRECTOS DE SOLDABILIDAD.

5.5.1.1 Ensayo Finger (fisuramiento en caliente)

Este ensayo (Fig. 5.5) que evalúa la susceptibilidad al fisuramiento, se lo realiza depositando un cordón de soldadura a través de barras (dedos) estrechamente comprimidas de modo que las interrupciones de continuidad simulan fisuras transversales de metal base. Los diversos grados de severidad de tensión inducida son dados variando el espesor de los dedos. La evaluación está basada en el porcentaje del ancho del cordón que contiene fisuras.⁵⁹

⁵⁸ ASM HANDBOOKI; (1993); *Welding, brazing and soldering*; American society of materials; Vol. 6; pág. 1230.

⁵⁹ MESSLER, Robert; (1999); *Principles Of Welding: Processes, Physics, Chemistry, And Metallurgy*; John Wiley;EEUU; pág. 582.

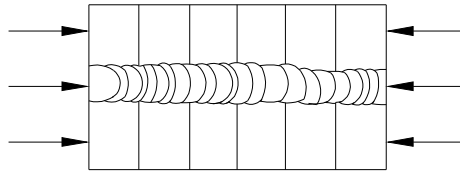


Figura 5.5 Esquema del ensayo Finger ⁶⁰

5.5.1.2 Ensayo Houldcroft (Fisuramiento en caliente)

Este ensayo de susceptibilidad al fisuramiento, comúnmente usado para el proceso GTAW, fue desarrollado para evaluar la tendencia al fisuramiento de láminas de acero. Para este ensayo, no se maquinan juntas (Fig. 5.6), pero se deposita un cordón de soldadura de penetración completa a lo largo de la muestra. La longitud de las principales fisuras en varias muestras, es usada como un índice de la susceptibilidad al fisuramiento. ^{60; 61}

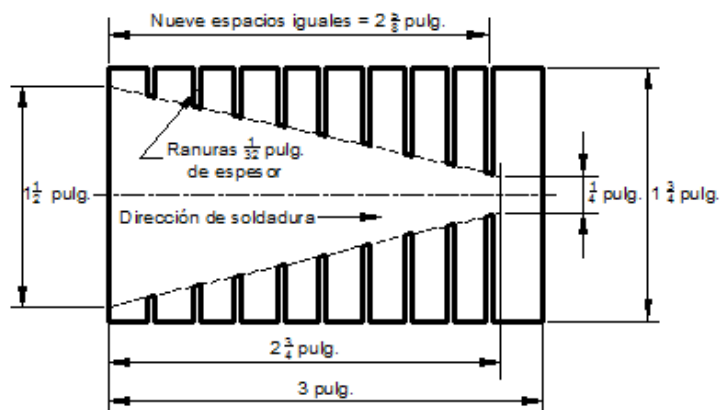


Figura 5.6 Esquema de la probeta para ensayo Houldcroft ^{60,61}

5.5.1.3 Ensayo Battelle (fisuramiento en caliente)

Keyhole slotted-plate restraint test; consiste en una variación al ensayo Houldcroft, para placas (fig. 5.7). Este ensayo fue desarrollado en Battelle. Busca evaluar la tendencia al fisuramiento del relleno depositado bajo condiciones de

⁶⁰ ASM HANDBOOKI; (1993); *Welding, brazing and soldering*; American society of materials; Vol. 6; pág. 1430.

⁶¹ MESSLER, Robert; (1999); *Principles Of Welding: Processes, Physics, Chemistry, And Metallurgy*; John Wiley;EEUU; pág. 582.

alta restricción, y utiliza una soldadura de ranura que inicia en el extremo de menor restricción. La sensibilidad al fisuramiento es determinada de forma similar al ensayo de Lehigh (5.5.1.4) en base a la sección sin ranuras correspondiente al cese de propagación de las fisuras.^{62; 63}

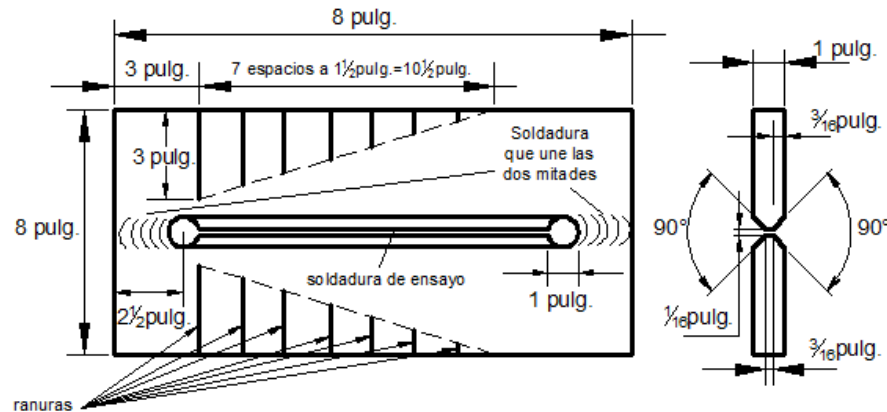


Figura 5.7 Esquema de la probeta para ensayo Battelle^{62;63}

5.5.1.4 Ensayo de restricción de Lehigh (fisuramiento en frío y en caliente)

Desarrollado en la universidad de Lehigh, este ensayo provee información del grado de restricción necesario para producir fisuramiento en la zona de fusión y en la zona afectada por el calor. El grado de restricción es modificado conforma se varíe la longitud de los surcos que se extienden desde los costados hacia la ranura de soldadura de la placa de ensayo (Fig. 5.8), surcos más largos, imponen mayor restricción; cada nivel de restricción requiere una placa diferente de ensayo. El fisuramiento es detectado examinando la sección transversal a la soldadura. La evaluación se basa en distancia mínima entre los extremos de ranuras opuestas en donde ha ocurrido el fisuramiento.^{62; 63}

⁶² MESSLER, Robert; (1999); "Principles Of Welding: Processes, Physics, Chemistry, And Metallurgy"; John Wiley;EEUU; pág. 583.

⁶³ ASM HANDBOOKI; (1993); "Welding, brazing and soldering"; American society of materials; Vol. 6; pág. 1431.

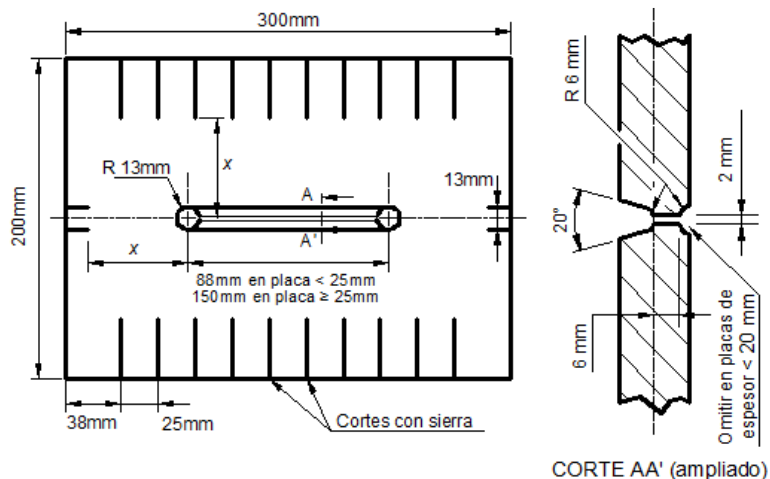


Figura 5.8 Esquema de la probeta para ensayo Lehigh ⁶⁴

5.5.1.5 Ensayo Varestraint, o de restricción variable (fisuramiento en caliente)

Desarrollado en el Instituto politécnico Rensselaer, es el ensayo más comúnmente utilizado para evaluar la sensibilidad al fisuramiento en caliente. El ensayo (comúnmente utilizado para el proceso GTAW) (Fig.5.9) es llevado a cabo mediante el depósito de una solda en una probeta montada en voladizo, la soldadura inicia desde el borde libre (izquierda en la figura), y continúa hasta que el arco alcanza un punto cercano al punto de tangencia entre la parte en voladizo y un dado con determinado radio de curvatura ubicado debajo del voladizo (punto “A” en la figura). La sección en cantiléver es entonces curvada mediante aplicación de fuerza neumática adoptando la forma del dado, entonces el arco continúa desplazándose hasta el punto “C” de la figura, en donde es apagado.

La evaluación de este ensayo se basa en uno o más de los siguientes puntos:

- A. La mínima deformación aplicada (determinada a partir del espesor de la probeta, y del dado utilizado) capaz de provocar el fisuramiento.
- B. La fisura de mayor longitud como indicativo de la susceptibilidad de la zona de fusión al fisuramiento en caliente.

⁶⁴ ASM HANDBOOKI; (1993); 'Welding, brazing and soldering'; American society of materials; Vol. 6; pág. 1431.

C. La longitud total de fisura, obtenida por la suma de las fisuras observadas en la zona de fusión y en la ZAC.

Existen también variaciones a este ensayo conocidas como: el ensayo TIG-A-MA-JIG (llamado también Spot varestreint test); y el ensayo Transvarestreint.^{65; 66}

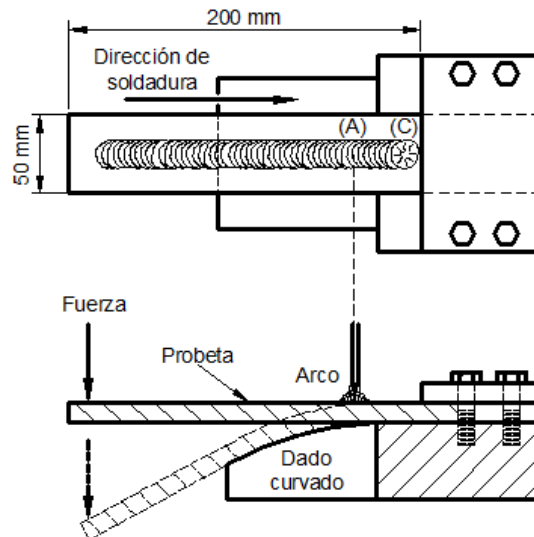


Figura 5.9 Esquema del ensayo Varestreint⁶⁸

5.5.1.6 Ensayo Murex (fisuramiento en caliente)

El ensayo es usado para obtener información comparativa de similares (o diferentes) materiales de aporte. El ensayo es llevado a cabo depositando soldadura en una ranura en "V" debida a la disposición del equipo formada entre dos placas de media pulgada de espesor (fig. 5.10). Cinco segundos después de que la soldadura ha comenzado, una de las placas es rotada aproximadamente 30°. La velocidad de rotación es ajustada para controlar deformaciones del metal soldado. La eficacia de este ensayo es evaluada en función de las longitudes de las fisuras que aparecen como resultado de la deformación.⁶⁷

⁶⁵ ASM HANDBOOKI; (1993); "Welding, brazing and soldering"; American society of materials; Vol. 6; pág. 1432.

⁶⁶ MESSLER, Robert; (1999); "Principles Of Welding: Processes, Physics, Chemistry, And Metallurgy"; John Wiley;EEUU; pág. 583.

⁶⁷ MESSLER, Robert; (1999); "Principles Of Welding: Processes, Physics, Chemistry, And Metallurgy"; John Wiley;EEUU; pág. 584.

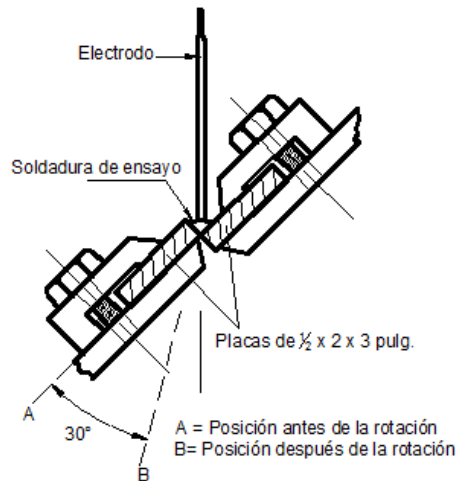


Figura 5.10 Esquema del ensayo Murex ⁶⁹

5.5.1.7 Ensayo de restricción y cerradura (fisuramiento en frío y en caliente)

Desarrollado por The Naval Research Laboratory, en este ensayo (fig. 5.11), la probeta es soldada a lo largo de la ranura, iniciando desde el extremo abierto avanzando hacia el agujero. Esta situación impone un variable grado de restricción a lo largo de la soldadura, siendo máximo en el agujero, y mínimo en el extremo donde inició la soldadura. Las fisuras se forman en el agujero, y se extienden hacia el exterior donde la restricción es lo suficientemente pequeña para que se detenga el crecimiento de las fisuras. La evaluación del ensayo se basa en la longitud de las fisuras, tiempo de fisuramiento, y ubicación de las fisuras. ⁶⁹

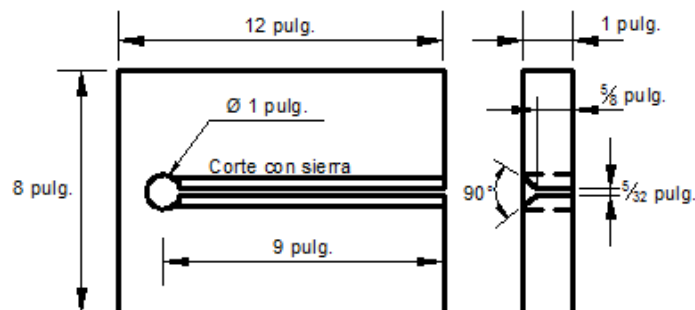


Figura 5.11 Esquema del ensayo de restricción y cerradura ⁶⁸

⁶⁸ ASM HANDBOOK; (1993); 'Welding, brazing and soldering'; American society of materials; Vol. 6; pág. 1433.

5.5.1.8 Ensayo de filete circular de la armada (fisuramiento en frío y en caliente)

NCFW.- Navy Circular-Fillet-Weldability Test; mostrado en la figura 5.12 también emplea una muestra que desarrolla autorestricción, y es usada para evaluar la susceptibilidad al fisuramiento en caliente en la zona de fusión y en la ZAC. En este ensayo, los esfuerzos incrementan conforme se incrementa el número de pases depositados. La capa en la cual se origina por primera vez el fisuramiento, junto con el tipo, cantidad y tamaño de las fisuras son tomadas en cuenta en la evaluación de resultados que se comparan con los resultados obtenidos del ensayo con otros materiales.⁶⁹

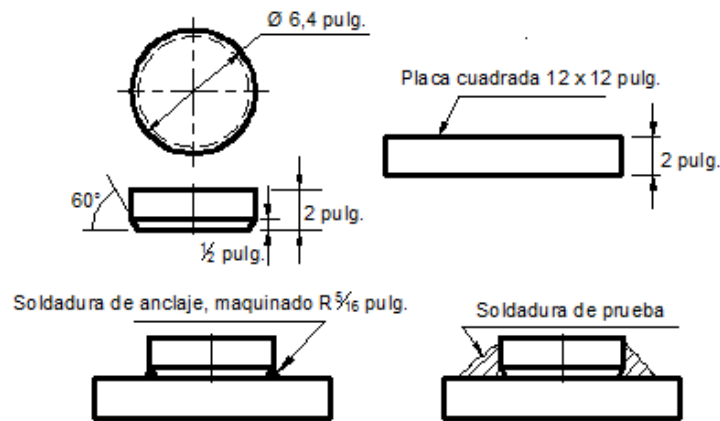


Figura 5.12 Ensayo de filete circular de la armada⁷¹

5.5.1.9 Ensayo de ranura circular (fisuramiento en frío y en caliente)

El ensayo de ranura circular (Fig. 5.13) es un ensayo de tipo “aprueba / no aprueba” (go/no-go) diseñado por “The Arcos Corporation” para evaluar el fisuramiento en la zona fundida y ZAC con varias combinaciones de material de aporte. La soldadura es depositada en una ranura circular maquinada en una placa cuadrada y la extensión del fisuramiento es expresada como un porcentaje de la longitud total de la soldadura. El ensayo puede ser evaluado mediante

⁶⁹ MESSLER, Robert; (1999); “Principles Of Welding: Processes, Physics, Chemistry, And Metallurgy”; John Wiley; EEUU; pág. 585.

variación del diámetro de la ranura maquinada o variando las dimensiones de la placa.⁷⁰

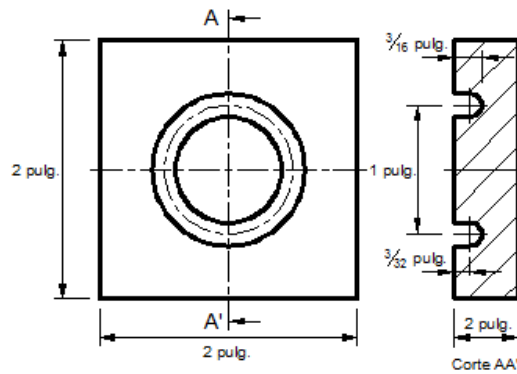


Figura 5.13 Ensayo de ranura circular⁷¹

5.5.1.10 Ensayo de ranura circular segmentada (fisuramiento en frío y en caliente)

Este ensayo es una modificación al ensayo de ranura circular. La probeta constituye en cuatro segmentos juntos fijados mediante pequeños pases de soldadura como en la configuración que se indica en la figura 5.14, posteriormente se deposita el cordón de soldadura de ensayo en la ranura circular. El alcance del fisuramiento es determinado separando los segmentos, y encontrando áreas de óxido como indicativo de la preexistencia de fisuras.⁷⁰

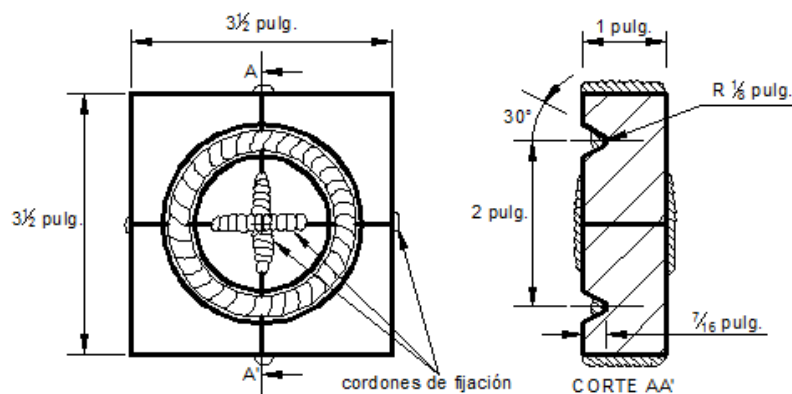


Figura 5.14 Ensayo de ranura circular segmentada⁷¹

⁷⁰ MESSLER, Robert; (1999); "Principles Of Welding: Processes, Physics, Chemistry, And Metallurgy"; John Wiley;EEUU; pág. 586..

⁷¹ ASM HANDBOOKI; (1993); 'Welding, brazing and soldering'; American society of materials; Vol. 6; pág. 1434.

5.5.1.11 Ensayo de parche circular (fisuramiento en frío y en caliente)

Diseñado para investigar el fisuramiento en la zona de fusión, y en la ZAC, la probeta (Fig. 5.15) consiste en un ensayo del tipo “aprueba / no aprueba” en la cual se utiliza una placa en la que se practica un orificio circular que es reemplazado por un parche; se deposita uno o más pases de soldadura entre la placa y el parche. El fisuramiento es detectado por inspección visual, radiográfica, o líquidos penetrantes.⁷²

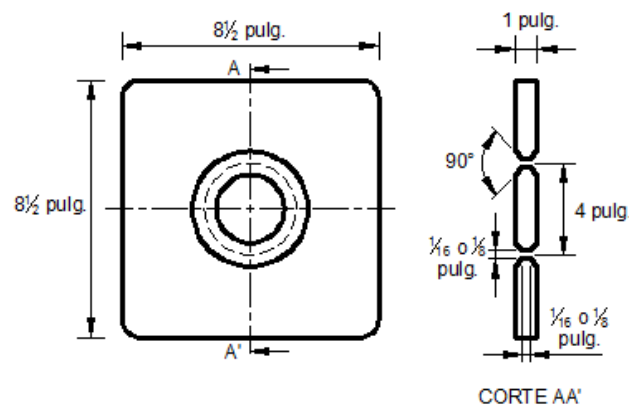


Figura 5.15 Ensayo de parche circular⁷³

5.5.1.12 Ensayo de parche circular de la armada (fisuramiento en frío y en caliente)

Mostrado en la figura 5.16, este ensayo que fue desarrollado por la agencia de navíos de la armada de los Estados Unidos, utiliza una probeta de dimensiones mayores al ensayo de parche circular (5.5.1.11), y es usado para evaluar diferentes electrodos en varios metales base. Un agujero circular es cortado en la placa en donde se coloca el parche, con un anillo de refuerzo que mantiene la placa y el parche juntos. Se depositan varios pases (un cuadrante a la vez, en el orden indicado en la figura 5.16). La evaluación del fisuramiento se la realiza mediante inspección visual, radiográfica, o mediante tintas penetrantes.⁷³

⁷² ASM HANDBOOKI; (1993); *Welding, brazing and soldering*; American society of materials; Vol. 6; pág. 1434.

⁷³ MESSLER, Robert; (1999); *Principles Of Welding: Processes, Physics, Chemistry, And Metallurgy*; John Wiley; EEUU; pág. 587.

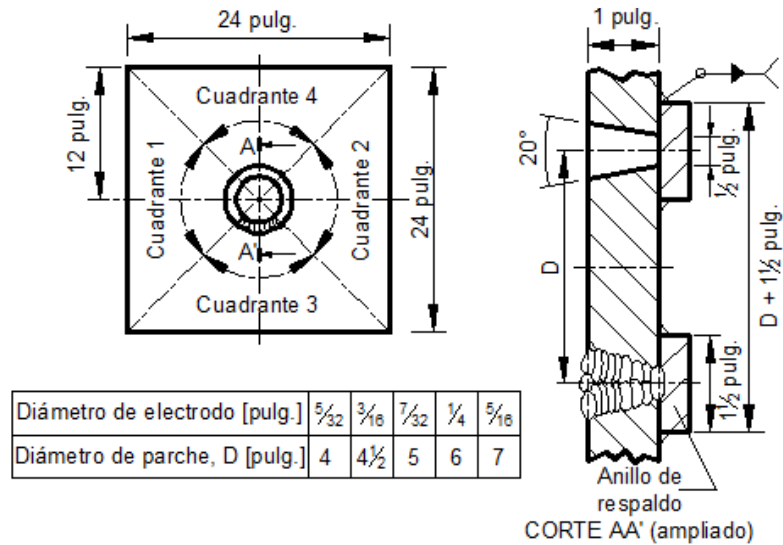


Figura 5.16 Ensayo de parche circular de la armada ⁷⁴

5.5.1.13 Ensayo Sigmajig (fisuramiento en caliente)

Desarrollado en “The Oak Ridge National Laboratory”, el ensayo consiste en aplicar un esfuerzo normal (σ) a una placa cuadrada de 50 mm de lado sujeta por mordazas de acero ubicadas en la configuración mostrada por la figura 5.17. La carga es aplicada y mantenida por un par de pernos que mediante arandelas Belleville aplican precarga a la probeta previamente a la soldadura. Varias muestras son soldadas (una después de otra), a lo largo de su centro usando el proceso GTAW. El esfuerzo aplicado es incrementado entre ensayos hasta que ocurre el fisuramiento. La medida del esfuerzo umbral necesario para producir el 100% de fisuramiento es usado como medida de la susceptibilidad al fisuramiento. ^{74; 75}

⁷⁴ ASM HANDBOOKI; (1993); *Welding, brazing and soldering*; American society of materials; Vol. 6; pág. 1435.

⁷⁵ MESSLER, Robert; (1999); *Principles Of Welding: Processes, Physics, Chemistry, And Metallurgy*; John Wiley;EEUU; pág. 588.

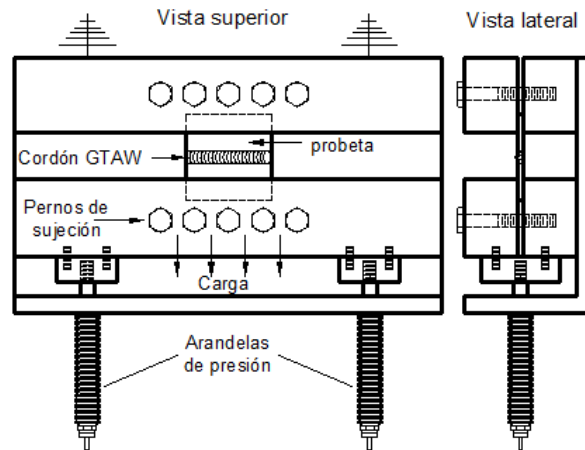


Figura 5.17 Esquema básico del funcionamiento del ensayo Sigmajig ⁷⁶

5.5.1.14 Ensayo de implante (fisuramiento en frío)

Ensayo estandarizado por las normas NF A 89-100, y NF A 03-185 de la Asociación Francesa de Normalización, consiste en una barra maquinada con una ranura circular o helicoidal (Fig. 5.18) del material base a ser ensayado. Esta barra es colocada en un agujero en el centro de una placa de modo que la parte superior de la barra quede al ras de la superficie de la placa. Se deposita un cordón de soldadura en la superficie de la placa que pase directamente sobre la superficie saliente de la barra. Al realizar la soldadura sobre la barra, la ranura en ella, está ubicada en la zona de granos bastos de la ZAC, que es más susceptible al fisuramiento inducido por hidrógeno. Dentro de los primeros 60 segundos de haber sido soldado, el conjunto soldado es colocado en un aparato que ejerce un esfuerzo de tracción en la barra que debe ser mantenido por 24 horas, o hasta que la soldadura falle. Se sueldan varias muestras que se ensayan bajo diferentes cargas. La susceptibilidad del metal base a fallar es medida por el grado al cual el esfuerzo de falla se reduce con el tiempo. ⁷⁷

⁷⁶ ASM HANDBOOKI; (1993); *Welding, brazing and soldering*; American society of materials; Vol. 6; pág. 1436.

⁷⁷MESSLER, Robert; (1999); *Principles Of Welding: Processes, Physics, Chemistry, And Metallurgy*; John Wiley;EEUU; pág. 589.

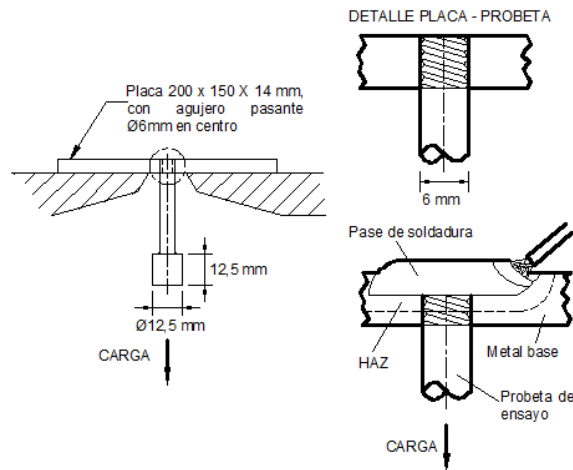


Figura 5.18 Disposición de la placa y probeta en el ensayo de implante ⁷⁸

5.5.1.15 Ensayo RPI de deformación incrementada (fisuramiento en frío)

Este ensayo fue diseñado para provocar una deformación reproducible en las fibras externas de una sección transversal de una soldadura. En la figura 5.19, al apretar el perno, la muestra es forzada a conformar la superficie de un dado curvado. El doblado debe ser completado antes que una muestra guardada en nitrógeno líquido haya tenido tiempo para calentarse hasta el rango en que ocurre el fisuramiento asistido por hidrógeno. El contenido crítico de hidrógeno difusible requerido para inducir fisuramiento en una microestructura particular con una magnitud dada de deformación aumentada es usado como índice de susceptibilidad de un acero al fisuramiento por hidrógeno. ⁷⁸

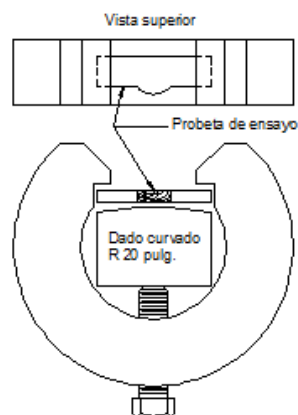


Figura 5.19 Esquema del ensayo RPI ⁷⁸

⁷⁸ MESSLER, Robert; (1999); "Principles Of Welding: Processes, Physics, Chemistry, And Metallurgy"; John Wiley;EEUU; pág. 589.

5.5.1.16 Ensayo de severidad térmica controlada (fisuramiento en frío)

Abreviado CTS por sus siglas en inglés, y normalizado por el estándar BS 7363 de la Institución de Estándares Británicos, el ensayo de severidad térmica controlada (Fig. 5.20) es usado para evaluar el efecto de la tasa de enfriamiento en el fisuramiento. La muestra consiste en dos placas firmemente empernadas entre sí para proveer contacto térmico íntimo. Las placas son mantenidas rígidamente en lugar mediante cordones de anclaje opuestos. En uno de los bordes restantes, después que los cordones de anclaje se han enfriado a la temperatura ambiente, se depositan pases denominados suelda bitérmica. El ensamble es dejado enfriar nuevamente, para luego depositar una suelda tritérmica en el borde restante, finalmente es mantenido a temperatura ambiente por 72 horas. Se calculan números de severidad térmica (TSN) en base a los espesores de las placas a través de las cuales se produce el flujo de calor. La evaluación se basa en la longitud de las fisuras observadas en secciones transversales de la soldadura como función del TSN.^{79; 80}

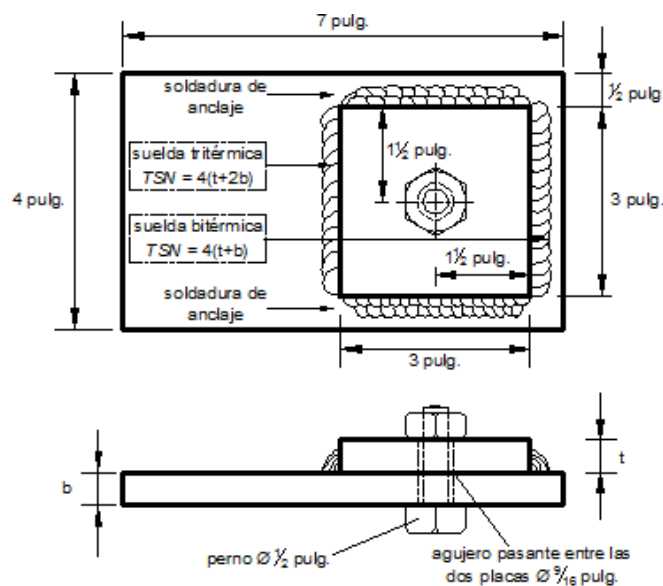


Figura 5.20 Ensayo CTS⁸⁰

⁷⁹ ASM HANDBOOKI; (1993); *Welding, brazing and soldering*; American society of materials; Vol. 6; pág. 1437.

⁸⁰ MESSLER, Robert; (1999); *Principles Of Welding: Processes, Physics, Chemistry, And Metallurgy*; John Wiley; EEUU; pág. 590.

5.5.1.17 Ensayo de ranura de Lehigh (Fisuramiento en frío)

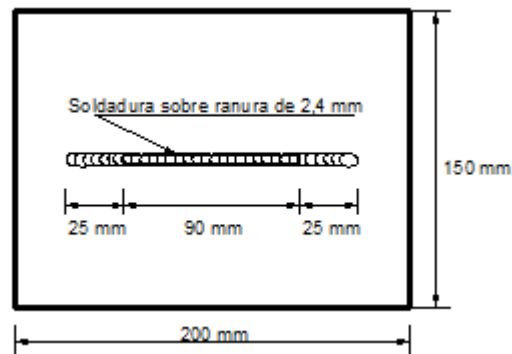


Figura 5.21 Ensayo de ranura de Lehigh ⁸¹

En este ensayo diseñado específicamente para prueba de campo de soldadura en tuberías de acero, un cordón de soldadura es depositado sobre una ranura cortada con sierra en una placa extraída de tubería. El cordón de soldadura se debe extender 25mm más allá del final de la ranura. La medición cuantitativa de la extensión del fisuramiento es obtenida mediante termocoloración de las superficies fisuradas con un tratamiento a 500°C por 24 horas. ⁸¹

5.5.1.18 Ensayo de cuña (fisuramiento en frío)

Análogamente al ensayo CTS (5.1.1.16), evalúa la susceptibilidad al fisuramiento por hidrógeno como función de la tasa de enfriamiento, con la diferencia de que este utiliza una muestra en forma de cuña (fig. 5.22). Siguiendo la deposición de un cordón desde el borde más delgado hasta el más ancho, este es seccionado longitudinalmente a lo largo de su línea central para revelar la ZAC. Las fisuras son medidas y equiparadas a tasas de enfriamiento basadas en el espesor. ⁸¹

⁸¹ MESSLER, Robert; (1999); "Principles Of Welding: Processes, Physics, Chemistry, And Metallurgy"; John Wiley;EEUU; pág. 589-590.

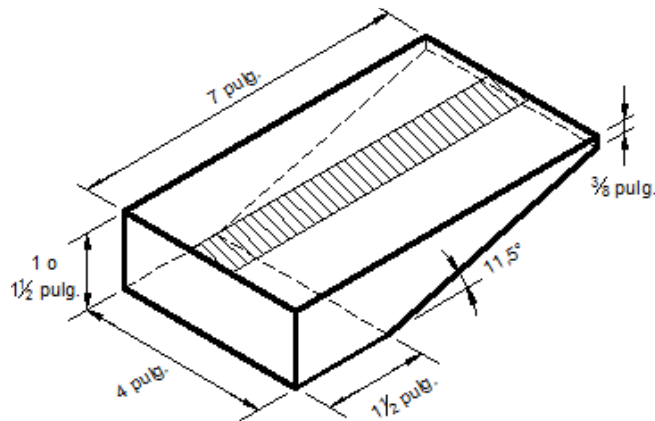


Figura 5.22 Ensayo de cuña ⁸²

5.5.1.19 Ensayo Tekken (Fisuramiento en frío)

Desarrollado en Japón, este ensayo se encuentra estandarizado por la norma japonesa JIS Z 3158, Se extiende sobre el ensayo de restricción de Lehigh (5.1.1.4). Una junta en “Y” genera más restricción que juntas “U” o “doble U”. En este ensayo, se varía principalmente precalentamientos para alterar el estado de esfuerzos y evaluar la severidad de fisuramiento (fig. 5.23). ^{82; 83}

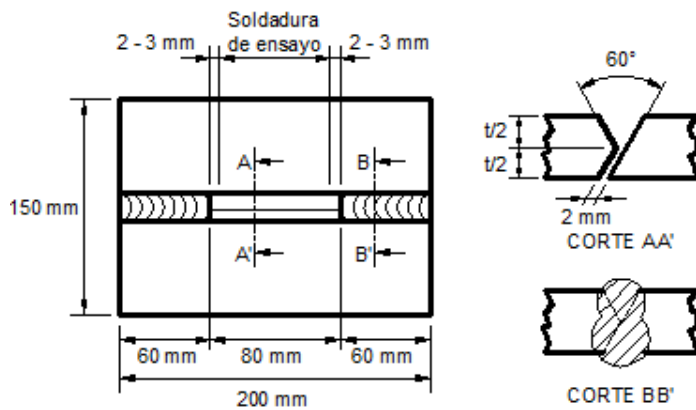


Figura 5.23 Ensayo Tekken ⁸³

⁸² ASM HANDBOOKI; (1993); *Welding, brazing and soldering*; American society of materials; Vol. 6; pág. 1440.

⁸³ MESSLER, Robert; (1999); *Principles Of Welding: Processes, Physics, Chemistry, And Metallurgy*; John Wiley;EEUU; pág. 590.

5.5.1.20 Ensayo gapped bead-on-plate, G-BOP (Fisuramiento en frío)

La susceptibilidad al fisuramiento del metal soldado como función de la composición química, precalentamiento, tasa de enfriamiento, y nivel de hidrógeno medido, pueden ser estudiados mediante el ensayo G-BOP. En este ensayo, sobre dos placas con una ranura maquinada se deposita un cordón de soldadura que atraviesa transversalmente las placas y la ranura, el cordón es realizado mientras las placas son prensadas entre sí como se observa en la figura 5.24, las placas soldadas son mantenidas en este arreglo durante 24 horas, posteriormente son removidas y dejadas otras 24 horas en espera de posible formación de fisuras. Posteriormente, en las cercanías a la ranura son calentadas mediante flama hasta alcanzar la coloración rojiza (dull-red heat). Después de permitir el enfriamiento a temperatura ambiente, el cordón es abierto para revelar algún fisuramiento en frío por la termocoloración debida al calentamiento con flama. Los Resultados son analizados estadísticamente para determinar los parámetros adecuados para minimizar el fisuramiento en frío.⁸⁴

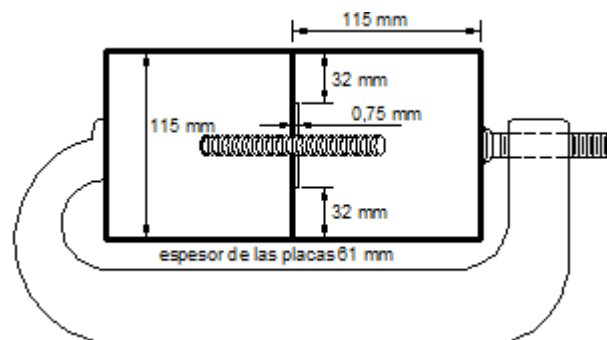


Figura 5.24 Esquema del ensayo G-BOP⁸⁵

5.5.1.21 Ensayo cruciforme (fisuramiento en frío)

Este ensayo usa tres placas dispuestas en la configuración de doble "T" mostrada en la figura 5.25 sujetas en sus extremos por dos cordones de anclaje. Se depositan cuatro cordones de ensayo con enfriamiento completo entre pases en el orden mostrado en la figura, la muestra es mantenida a temperatura

⁸⁴ ASM HANDBOOKI; (1993); *Welding, brazing and soldering*; American society of materials; Vol. 6; pág. 1441.

⁸⁵ MESSLER, Robert; (1999); *Principles Of Welding: Processes, Physics, Chemistry, And Metallurgy*; John Wiley;EEUU; pág. 591.

ambiente por un lapso no menor a 48 horas antes de recibir un tratamiento de alivio de esfuerzos a aproximadamente 620°C durante dos horas. El fisuramiento es evaluado de muestras metalográficas tomadas de secciones transversales de los cuatro pases. Debido a la sensibilidad en la preparación de las probetas, se realizan de cinco a diez ensayos.⁸⁶

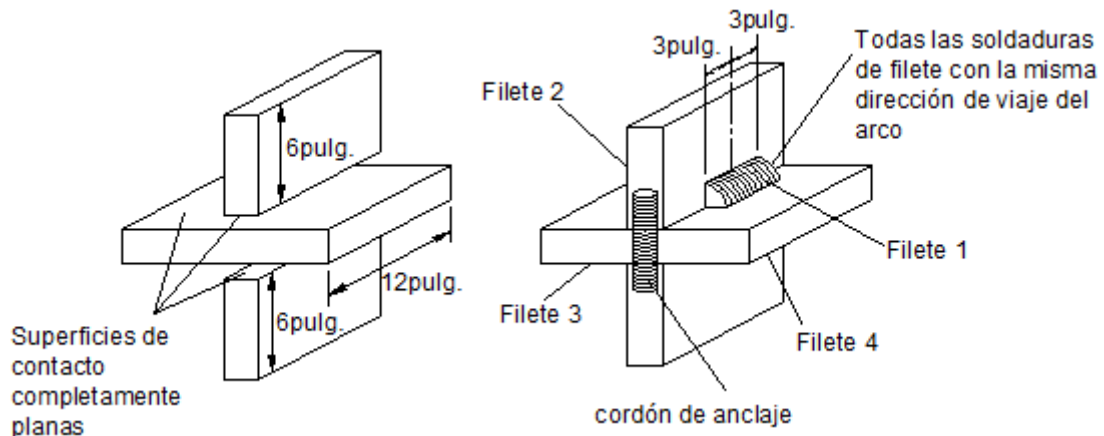


Figura 5.25 Ensayo cruciforme⁸⁶

5.5.1.22 Ensayo Vinkier (Fisuramiento en caliente)

Este ensayo consiste en una muestra hecha a partir de dos placas de 50mm de espesor soldadas juntas. Los extremos de la probeta soldada son entonces soldados a un bloque de acero inoxidable. Bajo tratamiento térmico posterior a la soldadura, la muestra está sujeta a cargas de tensión inducidas por el alto coeficiente de expansión térmica del bloque de acero inoxidable comparado con las piezas de acero (fig. 5.26). La deformación global puede ser calculada en función de las dimensiones de los elementos, sus módulos de elasticidad, y coeficientes de expansión térmica.⁸⁷

⁸⁶ MESSLER, Robert; (1999); *Principles Of Welding: Processes, Physics, Chemistry, And Metallurgy*; John Wiley;EEUU; pág. 591.

⁸⁷ ASM HANDBOOKI; (1993); *Welding, brazing and soldering*; American society of materials; Vol. 6; pág. 1441.

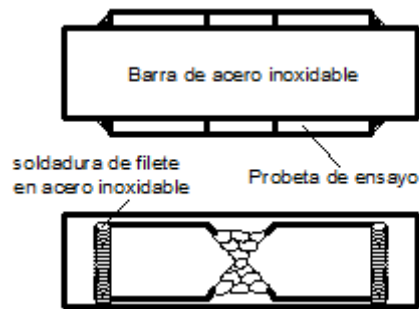


Figura 5.26 Ensayo Vinkier ⁸⁸

5.5.1.23 Ensayo de ranura espiral (Fisuramiento en caliente)

En la probeta (Figura 5.27) maquinada con una ranura espiral que atraviesa completamente la ZAC de una soldadura (real o simulada), este ensayo puede evaluar simultáneamente la susceptibilidad al fisuramiento por recalentamiento en todas las regiones afectadas térmicamente. La muestra es sometida bajo carga de tracción a 625°C por una hora y mantenida a esta temperatura hasta que se produzca la ruptura. Se registra el tiempo de ruptura, y la longitud total de la muestra, también la superficie de fractura se examina para determinar el modo de fractura. Normalmente, la muestra es seccionada longitudinalmente para determinar la ubicación precisa de la fractura dentro de la ZAC. ⁸⁸

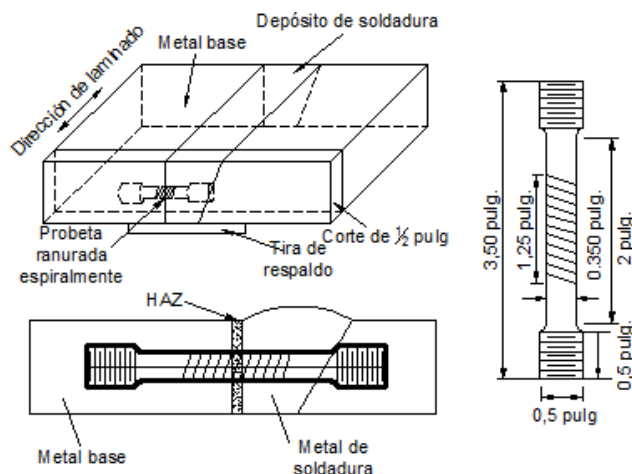


Figura 5.27 Ensayo de ranura espiral ⁸⁹

⁸⁸ ASM HANDBOOKI; (1993); *Welding, brazing and soldering*; American society of materials; Vol. 6; pág. 1442.

⁸⁹ MESSLER, Robert; (1999); *Principles Of Welding: Processes, Physics, Chemistry, And Metallurgy*; John Wiley;EEUU; pág. 592.

5.5.1.24 Ensayo en cantiléver de desgarre laminar de Lehigh (Desgarre laminar)

Este ensayo, emplea varios pases de soldadura en una ranura en “V” entre la placa vertical de prueba y una viga horizontal sujeta estrictamente (fig. 5.28). El extremo libre del elemento horizontal es sometido a una carga vertical aplicada sobre este, de modo que la región recientemente soldada tensiona la placa de prueba que tiende a abrir cualquier incipiente fisuramiento.⁸⁹

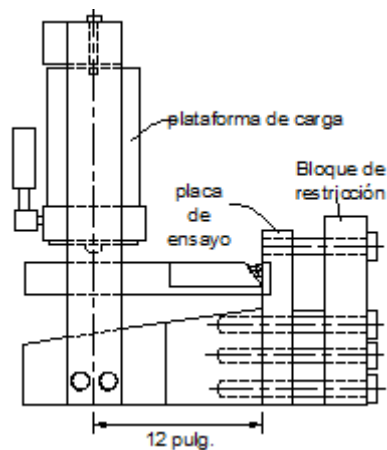


Figura 5.28 Ensayo en cantiléver de desgarre laminar⁸⁹

5.5.1.25 Ensayo Cranfield (desgarre laminar)

En este ensayo, una placa es biselada a 45° o 60° y soldada a otra mediante la deposición de varios pases en la ranura formada entre las placas, la resistencia al desgarre en función del número de pases tras el ensayo de varias muestras evalúa la susceptibilidad (fig. 5.29).^{90; 91}

⁹⁰ MESSLER, Robert; (1999); *“Principles Of Welding: Processes, Physics, Chemistry, And Metallurgy”*; John Wiley;EEUU; pág. 593.

⁹¹ ASM HANDBOOKI; (1993); *‘Welding, brazing and soldering’*; American society of materials; Vol. 6; pág. 1443.

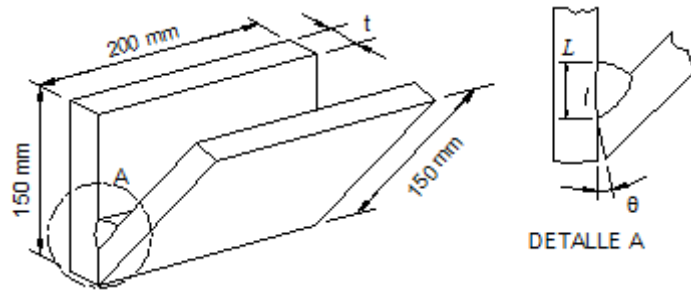


Figura 5.29 Esquema del ensayo Cranfield. ⁹⁰

5.5.1.26 Ensayo tensil de desgarre laminar (Desgarre laminar)

El ensayo usa una soldadura para permitir el maquinado de una probeta de tracción estándar que contenga la soldadura orientada transversalmente al centro de su longitud. Cuando la probeta es sometida a tracción la susceptibilidad al desgarre laminar es evaluada por el grado de degradación de la resistencia a la tracción (fig. 5.30).

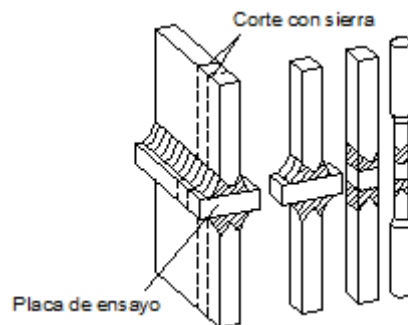


Figura 5.30 Ensayo tensil de desgarre laminar ⁹¹

5.5.2 ENSAYOS INDIRECTOS DE SOLDABILIDAD.

5.5.2.1 Ensayo de decantación por impulso

Diseñado para caracterizar la forma tridimensional de un charco de soldadura. El ensayo utiliza un chorro de alta presión de argón que es despedido a través de una boquilla GTAW modificada para desprender el charco líquido de soldadura dejando libre la cavidad formada. La forma del charco de soldadura puede ser evaluada de dos maneras: La primera consiste en utilizar goma de silicón para

crear una réplica de la cavidad del charco de soldadura; la otra consiste en medir directamente las dimensiones de la cavidad a lo largo de la superficie, y la realización de una sección metalográfica transversal a la cavidad.⁹²

5.5.2.2 Ensayo en simuladores Gleeble

El simulador Gleeble no está limitado solamente a aplicaciones de soldadura, sino que puede simular mediante control computarizado prácticamente cualquier proceso termomecánico. En este tipo de simulador, la muestra es calentada mediante resistencia a fin de simular la zona afectada por el calor en una soldadura real, la ventaja de este método es que genera amplios volúmenes microestructurales que simulan pequeñas regiones difíciles de analizar en la soldadura real.⁹³

5.5.2.3 Ensayo de ranura espiral (Fisuramiento en caliente)

Habiendo sido mencionada ya en 5.1.1.23, este ensayo puede ser considerado asimismo como un método indirecto de ensayo, pues en este también es posible simular la soldadura mediante calentamiento por resistencia generando así microestructuras propias de la zona afectada por el calor en un proceso de soldadura real.⁹³

⁹² ASM HANDBOOKI; (1993); *Welding, brazing and soldering*; American society of materials; Vol. 6; pág. 1444.

⁹³ MESSLER, Robert; (1999); *Principles Of Welding: Processes, Physics, Chemistry, And Metallurgy*; John Wiley;EEUU; pág. 594.

CAPÍTULO 6

PROCESO EXPERIMENTAL Y REGISTROS DE SOLDADURA

6. INTRODUCCION

El presente capítulo estará orientado a la evaluación de los diferentes ensayos de soldabilidad que nos permita determinar la factibilidad de soldar aceros al carbono y aceros inoxidable por el proceso GTAW, sin material de aporte. Además nos permita comparar la soldabilidad de los aceros inoxidable con distintos aceros al carbono, bajo las mismas condiciones.

6.1 SELECCIÓN DE LOS MATERIALES BASE

Para la evaluación de cada material se usará el método ordinal corregido de criterios ponderados, el cual clasifica por orden las diferentes alternativas para cada criterio. Se basa en unas tablas donde cada criterio (o alternativa, para un determinado criterio) se confrontan con los restantes criterios (o alternativas) y se asignan los siguientes valores: 3

- 1= Si el criterio (o alternativa) de las filas es superior (o mejor;>) que el de las columnas.
- 0,5= Si el criterio (o alternativa) de las filas es equivalente (=) al de las columnas.
- 0= Si el criterio (o alternativa) de las filas es inferior (o peor;<) que el de las columnas.

Para la selección del material base se consideran los siguientes criterios:

- Disponibilidad en el mercado
- Ventaja económica
- Calidad de soldadura

Las opciones del metal base a escoger son las siguientes:

- AISI 304
- AISI 316

Tabla 6.1 Alternativas de Aceros Inoxidables

Alternativas de aceros inoxidables	Designación
AISI 304	A
ASI 316	B

Tabla 6.2 Criterios de Selección

Criterios de selección	Designación
Calidad soldadura	X
Ventaja económica	Y
Disponibilidad en el mercado	Z

Tabla 6.3 Peso específico de cada criterio

Disponibilidad>Calidad>Disponibilidad					
Criterio	X	Y	Z	□+1	Ponderado
Calidad soldadura		1	0	2	0,33
Ventaja económica	0		0	1	0,17
Disponibilidad en el mercado	1	1		3	0,5
Suma:				6	1,00

Tabla 6.4 Peso específico del Criterio calidad de soldadura

Alternativa A=Alternativa B				
Alternativa	A	B	□+1	Ponderado
A		0,5	1,5	0,50
B	0,5		1,5	0,50
Suma:			3	1,00

Tabla 6.5 Peso específico del criterio ventaja económica

Alternativa A>Alternativa B				
Alternativa	A	B	□+1	Ponderado
A		1	2	0,67
B	0		1	0,33
Suma:			3	1,00

Tabla 6.6 Peso específico del criterio disponibilidad en el mercado

Alternativa A>Alternativa B				
Alternativa	A	B	□+1	Ponderado
A		1	2	0,67
B	0		1	0,33
Suma:			3	1,00

Tabla 6.7 Conclusiones

Resultados	X	Y	Z	□	Prioridad
Alternativa A	0,17	0,11	0,33	0,61	1
Alternativa B	0,17	0,06	0,17	0,39	2

Por lo tanto el acero inoxidable como mejor alternativa es el AISI 304.

NOTA: Para los aceros al carbono se escoge directamente los siguientes: SAE 1010 y ASTM A-36, por la baja disponibilidad de este tipo de aceros aleados, en el espesor requerido (3mm) para realizar una soldadura sin material de aporte.

6.2 SELECCION DEL ENSAYO DE SOLDABILIDAD


Para la realización del ensayo de soldabilidad para láminas de 3 mm, se escoge directamente los ensayos VARESTRAINT (también conocido como restricción variable) de acuerdo a la norma AWS B4.0M y de HOULDCROFT según el ASM Handbook Volume 6 Welding, Brazing, and Soldering , debido a que son los únicos ensayos para láminas de hasta 3mm soldadas mediante proceso GTAW.

6.3 ENSAYOS DE SOLDABILIDAD

6.3.1 DATOS TECNICOS DEL EQUIPO DE SOLDADURA GTAW

El equipo utilizado (ver tabla 6.8) para los dos ensayos de soldabilidad fue el que se encuentra disponible en el Laboratorio de Soldadura de la Facultad de Ingeniería Mecánica, utilizando las mismas condiciones de trabajo tanto para el ensayo Varestraint como Houldcroft.

Tabla 6.8 Especificaciones técnicas del equipo de soldadura para proceso GTAW⁹⁴

Datos Técnicos		
		
Tensión de red 50-80Hz		240V
Potencia primaria constante (100% DC)		3,3kVA
Grado de rendimiento		90% (70A)
Rango de corriente de soldadura	GTAW	3-270A
	Electrodo	10-270A
Corriente de soldadura	10min/25°C	40% DC 270A
		60% DC 140A
	10min/40°C	100% DC 110 ^a
		35% DC 170A
		60% DC 130A
		100% DC 100A
Tensión de marcha en vacío		50V
Tensión de trabajo	GTAW	10,1 - 16,8V
	Electrodo	20,4 - 25,8V
Dimensiones largo/ancho/altura		485x180x344mm
Peso		14,6 kg

⁹⁴ LINCOLN; (2008); "Catalogo para la Selección de Maquinas Soldadoras"; Ecuador.

6.3.2 ENSAYO DE SOLDABILIDAD VARESTRAINT O ENSAYO DE RESTRICCIÓN VARIABLE

El ensayo Varestraint o ensayo de restricción variable, se encuentra normalizado bajo la norma AWS B4.0 M; E5 (Ver Anexo 15.1). El ensayo Varestraint se utiliza para evaluar la soldabilidad del metal base y determinar la influencia de las variables de soldadura sobre la fisuración en caliente del metal base. El ensayo Varestraint aumenta los esfuerzos residuales (esfuerzos de tensión en el proceso de soldadura y esfuerzos de contracción en el enfriamiento de la soldadura) producidos en el cordón de soldadura y generando así fisuras en la soldadura. El ensayo se efectuara depositando un cordón de soldadura en un principio de viga en voladizo en un extremo de la probeta (Figura 3.24). Cuando la soldadura progresa a lo largo de la línea central de la probeta a un punto predeterminado (A), la probeta se inclina para ajustarse a un molde curvado (B) hasta que el arco siga a una ubicación (C) cerca del extremo de la probeta. El ensayo se efectuara variando los radios de una serie de dados para proporcionar diversas magnitudes de tensión, es decir, la tensión tangencial aumenta en el cordón de soldadura debido a la curvatura de los dados, así generando fisuras en el cordón. Debido que el espesor de la probeta es de 3mm, se utiliza el ensayo de mini-Varestraint siendo el único cambio las dimensiones de las probetas a soldar.

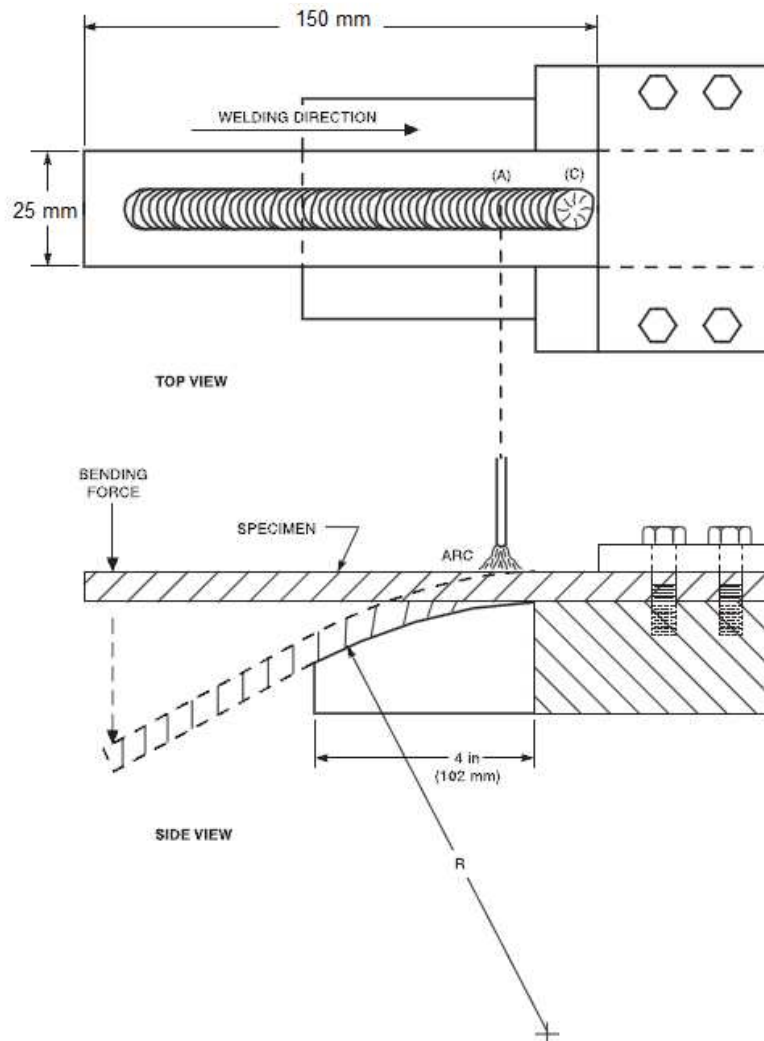


Figura 6.1 Probeta e Instalación del Ensayo Varestraint⁹⁵

La soldadura se realiza utilizando el proceso GTAW, el cordón de soldadura será realizado únicamente con el calor generado por la punta del electrodo, es decir se efectuara un cordón de soldadura sin la utilización de material de aporte (solo por fusión). Después de enfriarse, la superficie de la soldadura se examina para detectar la presencia de fisuras. Para este ensayo el equipo a utilizar consta de una mordaza que permite sujetar él un extremo de la probeta, mientras el otro extremo queda libre para que se le pueda aplicar una tensión, de tal manera que vaya adoptando la forma del dado curvo a lo largo del cordón de soldadura.

⁹⁵ AWS; (2007); "Norma AWS B4.0M"; American welding society; pág. 79.

La fuerza de plegado se puede aplicar de manera mecánica. La tensión tangencial que produce un cordón de soldadura aumenta para un determinado radio de curvatura del bloque del dado, y se puede calcular de la siguiente manera:

$$e = \frac{t}{(2R + t)} * 100$$

Donde

e = aumento de la tensión tangencial (%)

t = espesor del espécimen

R = radio del dado

6.3.2.1 Material base

Para los ensayos de soldabilidad se utilizan dos láminas de acero inoxidable AISI 304, las cuales serán soldadas con un acero estructural ASTM A-36, y también con un acero SAE 1010 como se detalla en el punto 6.1, cuyas dimensiones se basan en las normas mencionadas anteriormente (Ver fig. 6.2 y anexo 15.1).

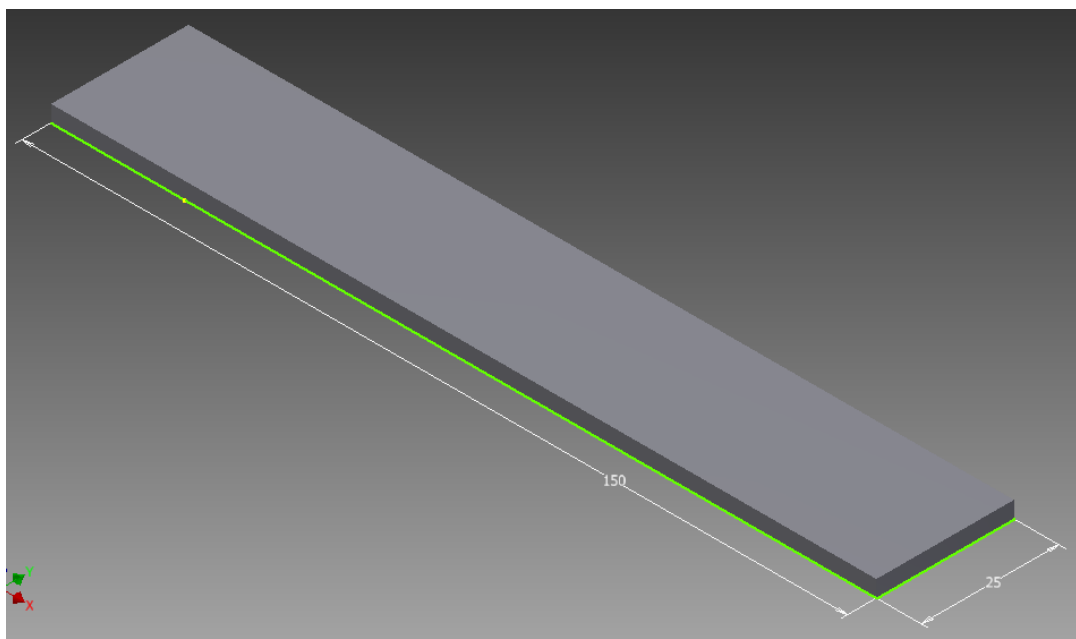


Figura 6.2 Material base para el ensayo Varestraint

La composición química de los metales base utilizados en la elaboración de las probetas se la detalla en la tabla 6.9.

Tabla 6.9 Especificaciones de los materiales base

Especificación del Acero ASTM-A36 (porcentaje en peso)														
C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Mo	V	Ni	Ti	Al	N	As	Nb
0,23	1	0,4	0,04	0,05	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Especificación del Acero SAE1010 (porcentaje en peso)														
C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Mo	V	Ni	Ti	Al	N	As	Nb
0,1	0,3	0,2	0,04	0,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Especificación del Acero AISI304 (porcentaje en peso)														
C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Mo	V	Ni	Ti	Al	N	As	Nb
0,08	2	1	0,04	0,01	-	18	-	-	9	-	-	-	-	-

6.3.2.2 Electroodos

Debido a que se realiza una soldadura sin material de aporte, se utiliza un electrodo no consumible para proceso GTAW, siendo este electrodo el EWTh-2 como lo establece la norma AWS D1.6 y AWS A.5.12 para soldar aceros inoxidable. Esto dado a que entre los dos aceros disimiles a soldar, el material más crítico o que regirá será el inoxidable. Los electrodos aleados con torio (EWTh) son usados principalmente con DC- debido a que producen excelente iniciación y estabilidad del arco. El electrodo es de 2.4mm de diámetro (3/32 in).

6.3.2.3 Probetas de ensayo

Para la comparación de la soldabilidad entre aceros inoxidable y aceros al carbono, y como se escogió anteriormente los materiales base a utilizar, se tiene las siguientes combinaciones de materiales (tabla 6.10):

Tabla 6.10 Codificación probetas

PROBETAS 1			PROBETAS 3		
AISI 304 (unidades)	SAE 1010 (unidades)	DESIGNACIÓN PROBETA	AISI 304 (unidades)	A-36 (unidades)	DESIGNACIÓN PROBETA
1	1	1 A	1	1	3 A
0	0	N/A	1	1	3 B
1	1	1 C	1	1	3 C
1	1	1 D	1	1	3 D
1	1	1 E	1	1	3 E

Se procede a codificar 9 probetas, siendo 4 probetas con la combinación de un acero AISI 304 con un acero al carbono SAE 1010, y 5 probetas de un acero AISI 304 con un acero estructural ASTM A-36 (fig.6.3).



Figura 6.3 Codificación de las probetas utilizadas para el ensayo Varestraint

6.3.2.4 Procedimiento Experimental

Una vez determinado, el número de probetas y nomenclatura de las mismas se procede a maquinar las caras de los aceros al carbono donde se realizan los cordones de soldadura, para evitar una posible contaminación del arco.

Una vez señaladas las probetas, se procede a alinear las caras a ser soldadas, siendo lo más paralelas posibles, debido al proceso que se realiza sin material de aporte, es decir se debe soldar con una junta a tope.

Posteriormente se procede a señalar la posición inicial y final del cordón de soldadura (10 a 15 mm desde los extremos de la probeta en dirección al extremo fijo que se encuentra en voladizo y siguiendo la línea central de la probeta) como los establece la norma AWS B4.0M; E5.

El cordón de soldadura se realiza mediante un pase (recto), en posición plana (1G), sin técnica de arrastre, la corriente utilizada fue de 106A DCEN (corriente continua con electrodo negativo), una tensión de 11V, y la velocidad de avance fluctúa entre 99 a 101 mm/min para las probetas ensayadas.

En los WPS (Ver Anexo 5), se especifican las variables, condiciones y parámetros de soldadura.

Luego de realizar la soldadura de las nueve probetas (1A, 3A, 1C, etc.) manteniendo siempre un ambiente libre de contaminación para evitar posibles defectos en el charco de soldadura, se almacenan las mismas en un ambiente libre de corrientes de aire para empezar los análisis de inspección después de 24 horas de terminado el proceso de soldadura. (Ver fig. 6.4).



Figura 6.4 Ensayo Varestraint (Probetas ensayadas)

Todos los datos de los parámetros utilizados en este ensayo son registrados en la respectiva hoja de resultados de prueba del ensayo VARENSTRAINT, para cada probeta de acuerdo a la norma AWS B4.0M; E5 (ver Anexo 9.1).

6.3.2.5 Proceso de Inspección

Como se explica anteriormente la inspección de los cordones de soldadura se realiza 24 horas después de culminada la etapa de soldadura del ensayo, en busca de la existencia de fisuras. Los criterios de aceptación o rechazo de las discontinuidades fueron analizadas mediante la norma AWS D1.6

A continuación se explica cada uno de los métodos de inspección realizados a las diferentes probetas recomendados por la norma, además de ensayos adicionales, en el Anexo 9 se tienen los registros de los ensayos.

6.3.2.6 Inspección Visual

Con la ayuda de un lente convexo, se procede a realizar la inspección visual de todas las probetas, como la norma B4.0M lo indica, con el objetivo de analizar superficialmente a lo largo de todo el cordón en busca de fisuras, y analizar en base a los criterios de aceptación de discontinuidades en la soldadura (fig. 6.5).⁹⁶



Figura 6.5 Inspección visual de fisuras superficiales

⁹⁶ AWS; (2007); "Norma AWS B4.0M"; American welding society; pág. 81.

Con el objeto de reforzar la inspección visual que se realizó, se procede a inspeccionar adicionalmente mediante tintas penetrantes todas las probetas aceptadas en el proceso de inspección visual.

En la figura 6.6 se puede observar el proceso de inspección mediante tintas penetrantes realizado en ocho probetas que pasan el proceso de inspección visual.

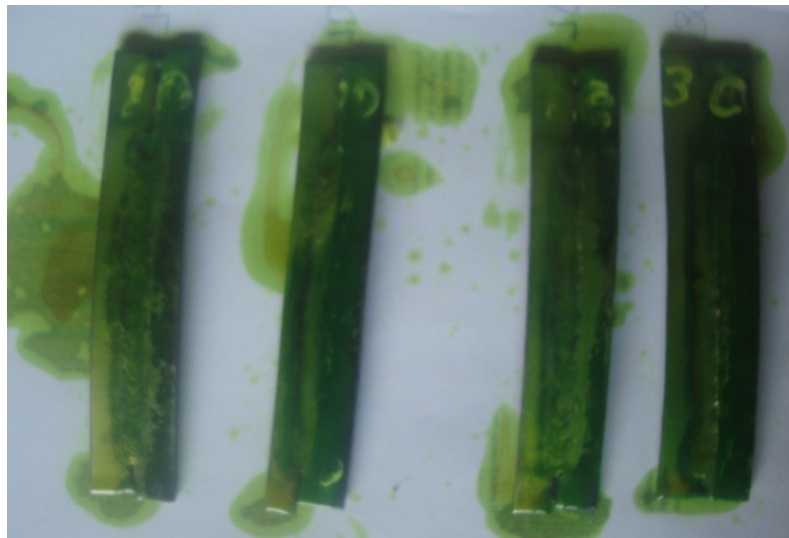


Figura 6.6 Inspección de fisuras superficiales mediante tintas penetrantes

6.3.2.7 Inspección Radiográfica

Para realizar el análisis interno del cordón se procede con la inspección radiográfica, luego de aplicar tintas penetrantes a las probetas, tal como lo estipula la norma, AWS B4.0M; E5, (Figura 6.7). A pesar de que la norma no establece que se realice este análisis a todas las probetas, se decide inspeccionar de esta forma con el objeto de asegurar una buena calidad en la inspección de las soldaduras.



Figura 6.7 Radiografías de las probetas

6.3.2.8 Inspección microscópica

Como lo establece la norma AWS B4.0M; E5, las probetas ensayadas deben ser analizadas en busca de fisuras mediante el uso de un microscopio de bajo poder con un aumento de 40X (Figura 6.8). Como todos los ensayos realizados, se procede a registrar los datos, en las respectivas hojas de inspección. (Anexo 9.1)



Figura 6.8 Inspección microscópica de fisuras

6.3.2.9 Resultados obtenidos

Realizado el proceso de inspección en búsqueda de fisuras producidas por el ensayo Varestraint de soldabilidad, se procede a registrar los datos obtenidos en cada uno de los procesos de inspección, así como las variables y parámetros utilizadas en el proceso de soldadura como lo establece las normas JIS Z 3158; y AWS B4.0M; E5.

6.3.2.9.1 . Resultados de la soldadura de ensayo

La norma JIS Z 3158; y AWS B4.0M; E5, establece que se debe registrar todos los parámetros y variables, usadas en el procedimiento de soldadura de ensayo. Algunos de los parámetros (metal base, espesor del metal base, electrodos, metal de aporte, diámetros del metal de aporte y electrodo, gas de protección) son registrados en el WPS (Anexo 5).

Otras variables importantes como los valores de fuerza aplicada, voltaje, corriente y velocidad, además del valor calculado del calor aportado con estos datos, son registrados en la tabla 6.11.

Tabla 6.11 Parámetros y variables utilizadas para la soldadura de ensayo

PROBETA	V	I	S	t	L	Q	Humedad Relativa	Fuerza Aplicada	Temperatura Ambiente
	(V)	[A]	[mm/min]	[min]	[mm]	[J/mm]	[%]	[N]	[C]
1A	12.3	106	100.00	1.00	100	782.28	70	8.82	20
1C	12.3	106	109.09	0.92	100	717.09	70	1	20
1D	12.3	106	109.09	0.92	100	717.09	70	1	20
1E	12.3	106	107.14	0.93	100	730.13	70	8.82	20
3A	12.3	106	72.46	1.38	100	1079.55	70	8.82	20
3C	12.3	106	86.96	1.15	100	899.62	70	1	20
3D	12.3	106	95.24	1.05	100	821.39	70	1	20
3E	12.3	106	94.34	1.06	100	829.22	70	8.82	20

6.3.2.9.2 Resultados de la inspección de fisuras superficiales

Los resultados obtenidos de la inspección superficial son registrados y analizados en el anexo 9.1. A continuación se resume la presencia o no de fisuras superficiales en cada una de las probetas analizadas para el ensayo de soldabilidad Varestreint en la tabla 6.12.

Tabla 6.12 Resultados de la presencia de fisuras superficiales

PROBETA	PRESENCIA DE FISURAS				CANTIDAD DE FISURAS	LONGITUD DE FISURAS [mm]
	INSPECCION VISUAL		INSPECCION POR TINTAS PENETRANTES			
1 A	SI	NO	SI	NO		
1C	SI	NO	SI	NO		
1D	SI	NO	SI	NO		
1E	SI	NO	SI	NO		
3 A	SI	NO	SI	NO		
3C	SI	NO	SI	NO		
3D	SI	NO	SI	NO		
3E	SI	NO	SI	NO		

6.3.2.9.3 *Resultados de la inspección radiográfica*

Los resultados de la inspección radiográfica y los parámetros utilizados para realizar esta inspección, se detallan para cada probeta en el anexo 9.2. Estas radiografías fueron inspeccionadas mediante un negatoscopio, para posteriormente ser analizadas bajo los criterios de la norma AWS D1.6 (criterios de aceptación o rechazo de discontinuidades, en caso de existir).

En la tabla 6.13 se resume los resultados obtenidos al realizar la inspección radiográfica a las probetas del ensayo de soldabilidad Varestraint.

Tabla 6.13 Resultados obtenidos de la inspección radiográfica

PROBETA	DISCONTINUIDADES EN LAS RADIOGRAFIAS				DESCRIPCION
	FISURAS		OTRA DISCONTINUIDAD		
1 A	SI	NO	SI	NO	
1C	SI	NO	SI	NO	FALTA DE PENETRACION
1D	SI	NO	SI	NO	
1E	SI	NO	SI	NO	FALTA DE PENETRACION
3 A	SI	NO	SI	NO	
3C	SI	NO	SI	NO	FALTA DE PENETRACION
3D	SI	NO	SI	NO	FALTA DE PENETRACION
3E	SI	NO	SI	NO	

6.3.2.9.4 Resultados de la inspección microscópica

Los resultados obtenidos de la inspección microscópica con un aumento de 40X de los cordones realizados en las 3 probetas se encuentran registrados en su totalidad, en el anexo 9.1.

En la tabla 6.14 se resume de una manera sintetizada los datos obtenidos del análisis microscópico.

Tabla 6.14 Inspección de las probetas microscópicamente

PROBETA	DISCONTINUIDADES ENCONTRADAS MICROSCOPICAMENTE				OBSERVACIONES
	FISURAS		OTRAS DISCONTINUIDADES		
1 A	SI	NO	SI	NO	
1C	SI	NO	SI	NO	
1D	SI	NO	SI	NO	
1E	SI	NO	SI	NO	
3 A	SI	NO	SI	NO	
3C	SI	NO	SI	NO	
3D	SI	NO	SI	NO	
3E	SI	NO	SI	NO	

6.3.2.10 Análisis Suplementarios

La norma AWS B4.0M; E5, no estipulan algún otro ensayo de los ya realizados, pero para un mejor análisis de la soldabilidad que presentaron las probetas soldadas con el proceso GTAW sin material de aporte se procedió a realizar las curvas de enfriamiento y análisis metalográfico.

6.3.2.10.1 Temperaturas de enfriamiento

Posteriormente a los ensayos ya estudiados anteriormente se procedió a un análisis de la variación de la temperatura de enfriamiento, para la probeta tipo "1A" y "3 A", para posteriormente ser comparada con el otro ensayo de soldabilidad. Para la medición de las temperaturas se procedió a utilizar un pirómetro (marca "FLUKE" 68). Las mediciones se realizaron a una distancia de 10mm del eje axial del cordón de soldadura, en el cual posiblemente se encuentra

localizada la ZAC; dichas mediciones de temperatura se realizaron cada 60 segundos, hasta que la temperatura se estabilice; en cada uno de los materiales bases. Los datos obtenidos de las temperaturas de enfriamiento se pueden observar en la tabla 6.15. Los gráficos representativos de la variación de la temperatura de enfriamiento se puede observar en la figura 6.9.

Tabla 6.15 Curva de enfriamiento de los materiales bases del ensayo Varestraint

TIEMPO [MIN]	TEMPERATURA [°C]		TEMPERATURA [°C]	
	SAE 1010	AISI 304	ASTM A-36	AISI 304
1	365	218	430,8	412
2	175	121	250,2	245,2
3	76	83,8	135,2	126,2
4	46,2	76,8	101	105,2
5	32,6	72,3	90,5	91
6	31,4	65,4	84,8	83,2
7	30,4	60,8	79,4	71,6
8	29	52,5	71,2	68,4
9	28,7	50	66,4	62,2
10	28,2	49,1	61,2	60,2
11	27,6	43,2	60	53
12	26,4	41,4	44,3	42
13	25,8	32,8	33,8	31,5
14	24,2	28	29	29,6
15	23,8	26,2	27,8	26,4
16	23,6	25,6	24,8	22,6
17	23,2	24,2	22,4	21,8
18	23	22,2	22	21
19	23	22	22	21
20	23	22	22	21

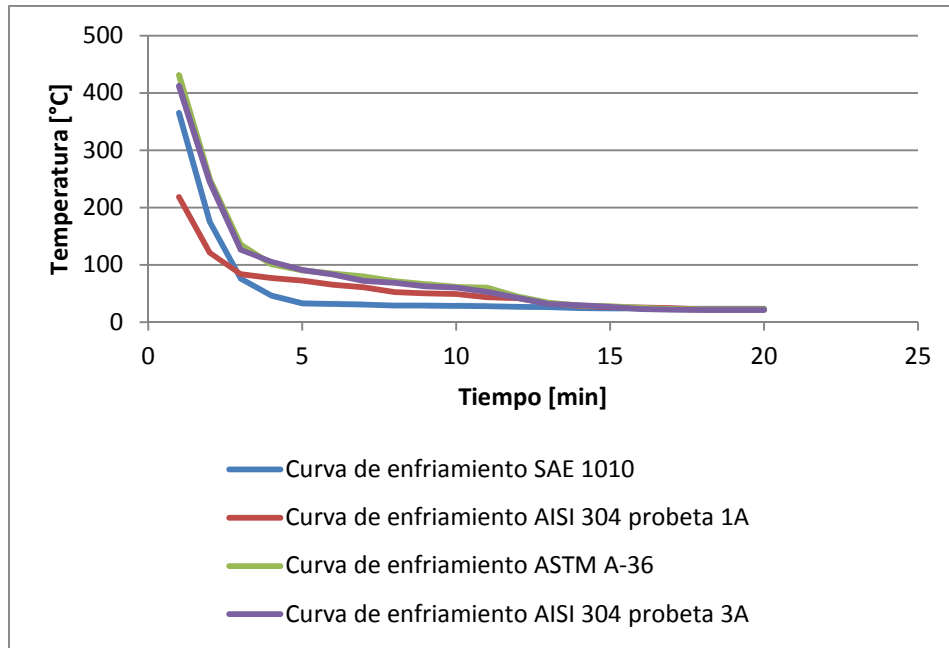


Figura 6.9 Curva de enfriamiento de las probetas ensayadas

6.3.2.10.2 Análisis Metalográfico

Para el análisis metalográfico se decide realizar, únicamente a las probetas 1 A, 1C, 3 A, 3C, que son las probetas con mayor penetración, y que no presentan ningún tipo de discontinuidad superficial (fig. 6.10). Este análisis se lo realiza con el objeto de observar el estado interno del cordón de soldadura, la ZAC, y encontrar posibles fisuras internas.



Figura 6.10 Probetas para ensayo metalográfico

El análisis metalográfico se lo realiza en dos partes: un análisis preliminar mediante macrografías a 10X, en las cuales las muestras fueron desbastadas,

pulidas (con material abrasivo fino), y atacadas con Nital al 2%(aceros al carbono) y Marble (aceros inoxidables).

El segundo análisis se realiza mediante micrografías con aumentos a 100X y 500X, en las cuales las muestras fueron pulidas en paño con alúmina, con el objeto de tener una superficie sin imperfecciones, y posteriormente atacadas con Nital al 2%(aceros al carbono) y Marble (aceros inoxidables).

Debido a la dificultad para pulir el acero inoxidable austenítico, se procedió a realizar el ataque electrolítico a una muestra de este material para poder observar la estructura interna de este material.

6.3.2.10.3 Análisis Macrográfico

Las macrografías se realizan en las cuatro probetas antes mencionadas en el punto 6.3.2.10.1, con el objeto de comprobar la distribución de defectos como grietas superficiales, rechupes, partes soldadas. Las macrografías de las diferentes muestras se pueden observar en las tablas 6.16, 6.17, 6.18 y 6.19.

Tabla 6.16 Análisis macrográfico con aumento 10X de la muestra 1 A

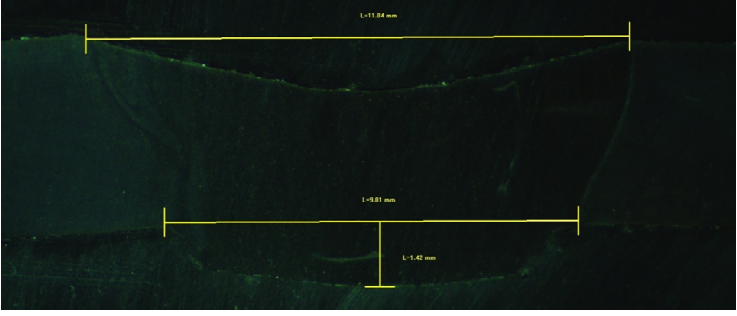
Material (a)	Material (b)	Proceso	Temperatura de precalentamiento	Observaciones	Tipo de Discontinuidad	Tamaño de la discontinuidad
						
SAE 1010	AISI 304	GTAW	Ambiente	Se observa un cordón de soldadura con fusión completa entre el metal base y el cordón de soldadura, con penetración en la raíz y sin presencia de discontinuidades.	Ninguna	-----

Tabla 6.17 Análisis macrográfico con aumento 10X de la muestra 1 C


Material (a)	Material (b)	Proceso	Temperatura de precalentamiento	Observaciones	Tipo de Discontinuidad	Tamaño de la discontinuidad
						
SAE 1010	AISI 304	GTAW	Ambiente	Se observa un cordón de soldadura con fusión completa entre el metal base y el cordón de soldadura, con penetración un poco excesiva en la raíz y sin presencia de discontinuidades.	Ninguna	-----

Tabla 6.18 Análisis macrográfico con aumento 10X de la muestra 3 A

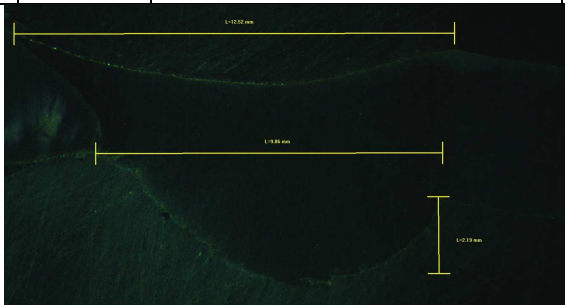
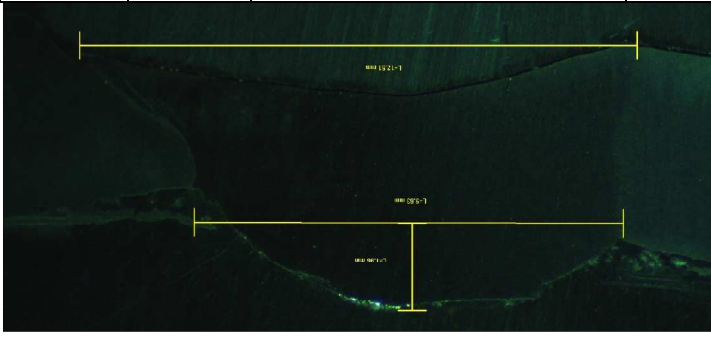
Material (a)	Material (b)	Proceso	Temperatura de precalentamiento	Observaciones	Tipo de Discontinuidad	Tamaño de la discontinuidad
						
ASTM A-36	AISI 304	GTAW	Ambiente	Se observa un cordón de soldadura con fusión completa entre el metal base y el cordón de soldadura, con penetración en la raíz y sin presencia de discontinuidades.	Ninguna	-----

Tabla 6.19 Análisis macrográfico con aumento 10X de la muestra 3C

Material (a)	Material (b)	Proceso	Temperatura de precalentamiento	Observaciones	Tipo de Discontinuidad	Tamaño de la discontinuidad
						
ASTM A-36	AISI 304	GTAW	Ambiente	Se observa un cordón de soldadura con fusión completa entre el metal base y el cordón de soldadura, con penetración en la raíz y sin presencia de discontinuidades.	Ninguna	-----

6.3.2.10.4 Análisis Micrográfico

Las micrografías se realizan luego de que las probetas hayan pasado por el análisis micrográfico, por lo tanto se procede a realizar este análisis en las cuatro probetas analizadas en el 6.3.2.10.1, con el objeto de observar características estructurales, deducir posibles variaciones que experimentan las propiedades mecánicas de los metales base luego del proceso de soldadura.

Las micrografías de las diferentes muestras se pueden observar en las tablas 6.20, 6.21, 6.22 y 6.23.

Tabla 6.20 Micrografías de la muestra 1 A

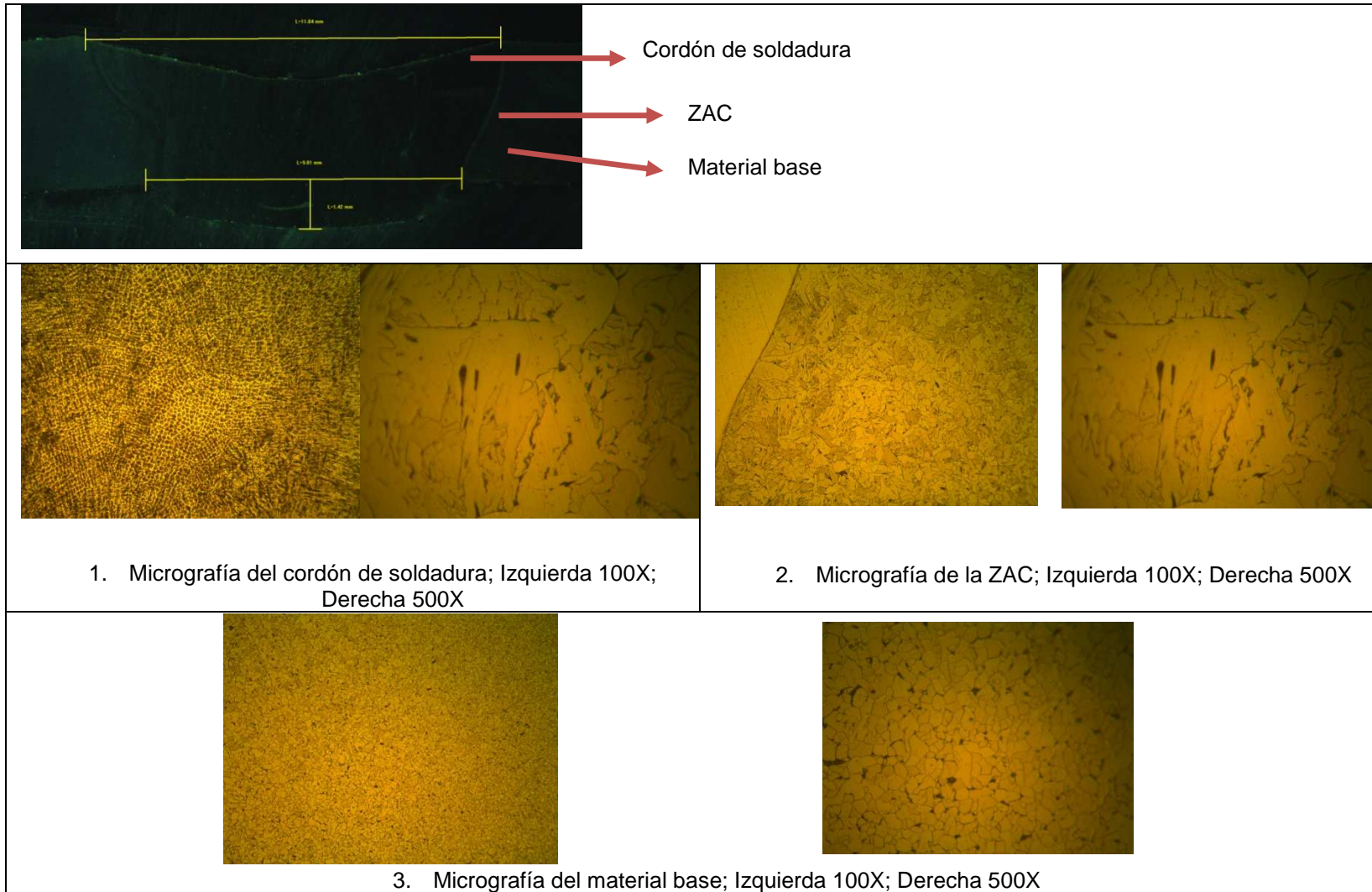


Tabla 6.21 Micrografías de la muestra 1C


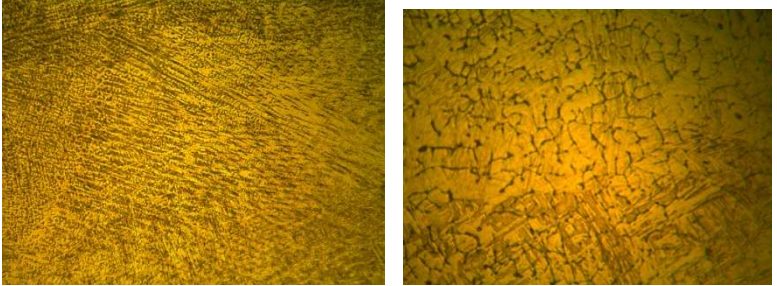
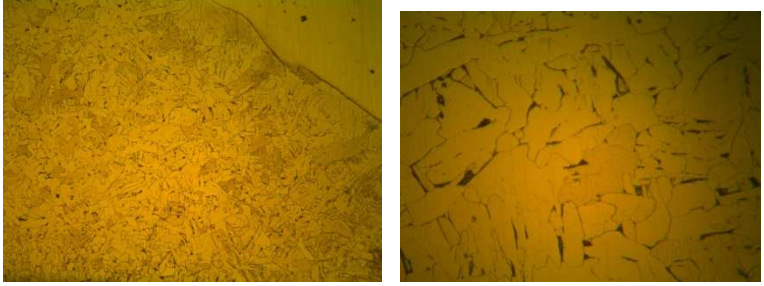

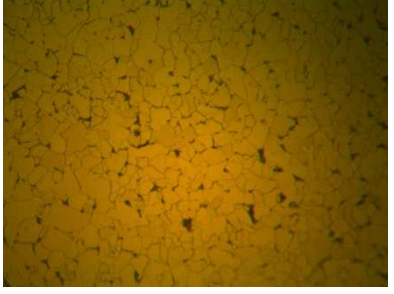
	<p>→ Cordón de soldadura</p> <p>→ ZAC</p> <p>→ Material base</p>
	
<p>1. Micrografía del cordón de soldadura; Izquierda 100X; Derecha 500X</p>	<p>2. Micrografía de la ZAC; Izquierda 100X; Derecha 500X</p>
	
<p>3. Micrografía del material base; Izquierda 100X; Derecha 500X</p>	

Tabla 6.22 Micrografías de la muestra 3 A

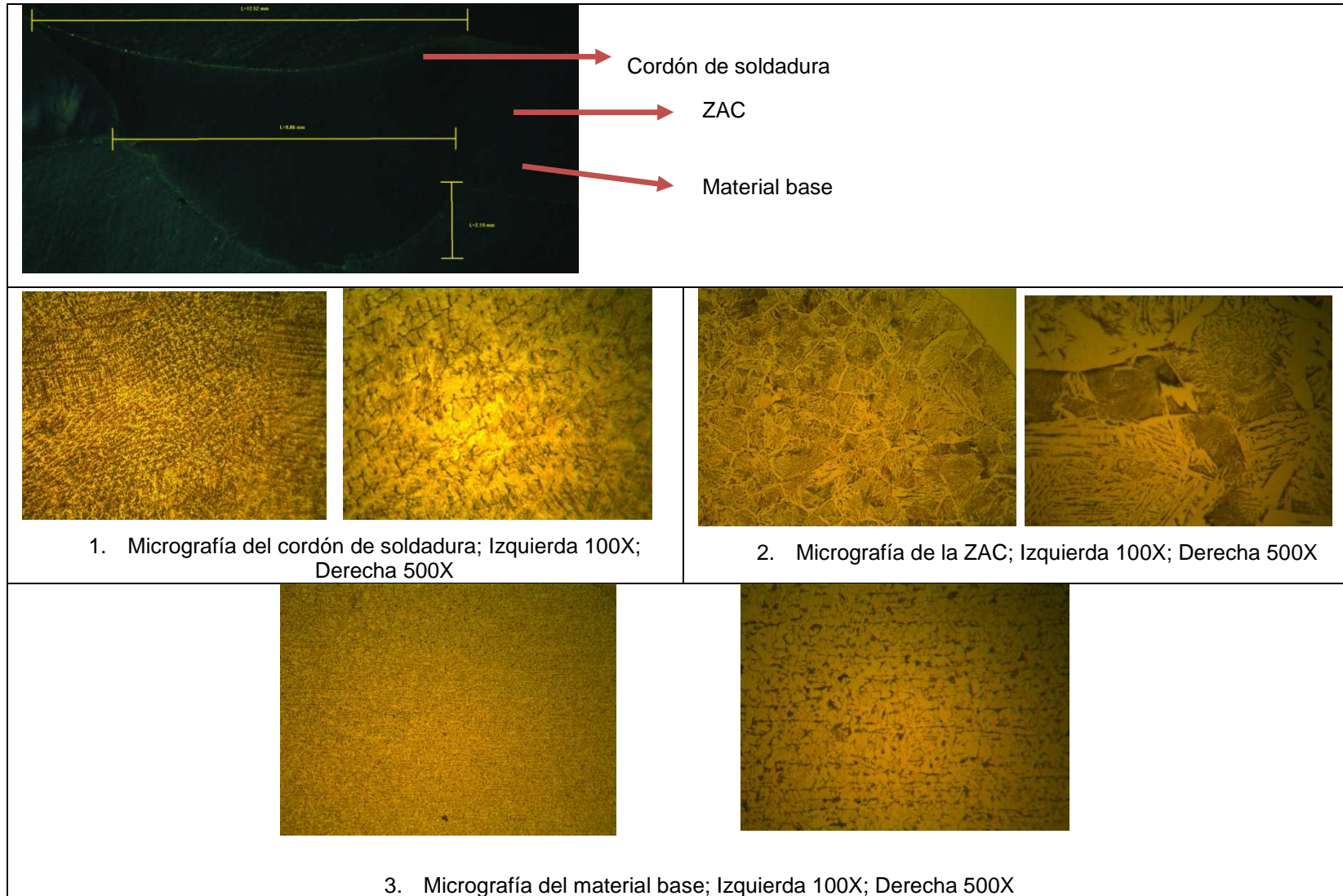
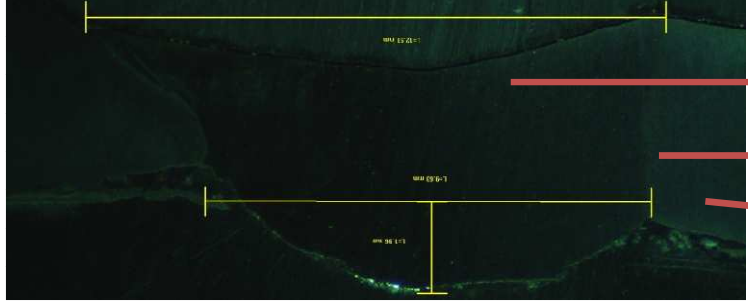
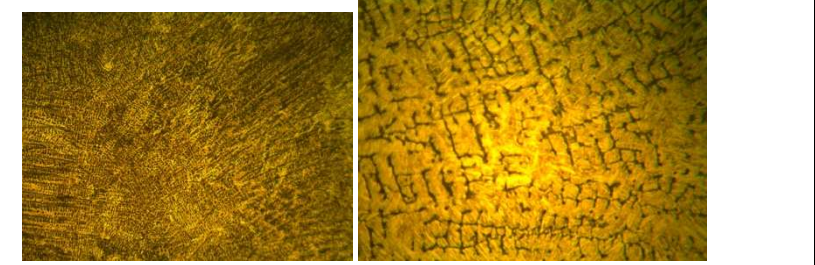
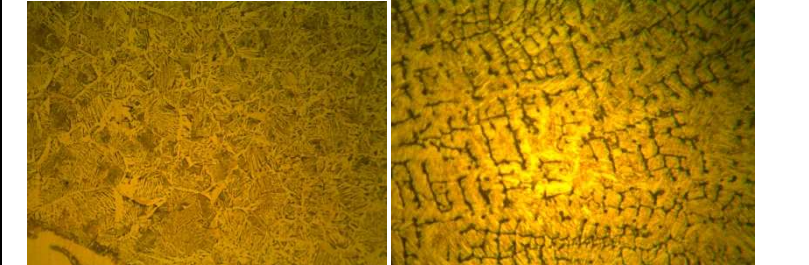




Tabla 6.23 Micrografías de la muestra 3C

	<p>→ Cordón de soldadura</p> <p>→ ZAC</p> <p>→ Material base</p>
	
<p>1. Micrografía del cordón de soldadura; Izquierda 100X; Derecha 500X</p>	<p>2. Micrografía de la ZAC; Izquierda 100X; Derecha 500X</p>
	
<p>3. Micrografía del material base; Izquierda 100X; Derecha 500X</p>	

6.3.3 ENSAYO DE SOLDABILIDAD HOULDCROFT O ENSAYO DE FISURAMIENTO EN CALIENTE

El ensayo HOULDCROFT o ensayo de fisuramiento en caliente, no se encuentra normalizado bajo ningún estándar internacional, pero se encuentra citado dentro de los ensayos directos de soldabilidad detallados en el ASM HANDBOOK. Vol. 6, de la ASM International. El ensayo Houldcroft es un ensayo sin diseño especial en la junta, más bien una junta a tope, soldadura de penetración completa, y por lo general es utilizado con el proceso de soldadura GTAW. El ensayo se efectuara depositando un cordón de soldadura con penetración completa en una probeta con varias ranuras, las cuales van aumentando conforme avance el cordón en la dirección de soldadura (Figura 6.11), esta progresión de las ranuras permite la disipación de las tensiones internas. Como criterio de susceptibilidad de agrietamiento, la longitud de grieta se mide desde el inicio de la soldadura. La completa penetración de soldadura debe ser asegurada a lo largo de la totalidad soldadura.

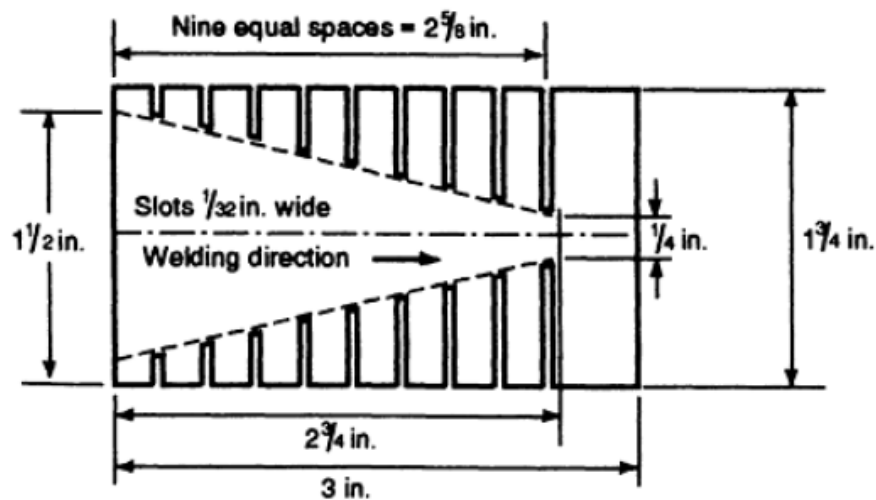


Figura 6.11 Dimensiones del espécimen para el ensayo Houldcroft⁹⁷

De igual manera que para el ensayo de soldabilidad Varestraint, la soldadura se realiza utilizando el proceso GTAW, y únicamente se obtiene un cordón por fusión, es decir con el calor generado por la punta del electrodo no consumible.

⁹⁷ ASM HANDBOOK; (1993); 'Welding, brazing and soldering'; American society of materials; Vol. 6; pág. 1420.

Después de enfriarse, la superficie de la soldadura se examina para detectar la presencia de fisuras. En este ensayo no se utiliza ningún equipo adicional al necesario para realizar una soldadura por proceso GTAW, como mordazas o dados que si se utilizan para el ensayo de soldabilidad de Varestraint.

6.3.3.1 Material base

Para los ensayos de soldabilidad se utilizan dos láminas de acero inoxidable AISI 304, la primera será soldada con un acero estructural ASTM A-36, y la otra con un acero SAE 1010 como se detalla en el punto 6.1, cuyas dimensiones se basan en lo mencionado por las ASM International, en el ASM HANDBOOK. Vol.6. Welding Brazing and Soldering. (Ver fig. 6.12).

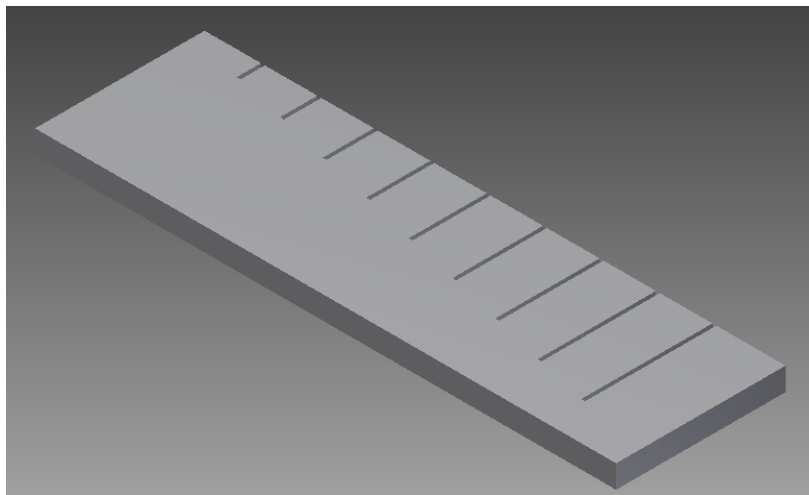


Figura 6.12 Material base para el ensayo Houldcroft

La composición química de los metales base utilizados en la elaboración de las probetas se la detalla en la tabla 6.9.

6.3.3.2 Electrodo

Como se realizan los dos ensayos de soldabilidad bajo los mismos parámetros de soldadura, al igual que para el ensayo Varestraint sin material de aporte, se utilizara un electrodo no consumible para proceso GTAW, siendo este electrodo el

EWTh-2 como lo establece la norma AWS D1.6 y AWS A.5.12 para soldar aceros inoxidable, que es el acero más crítico o el que regirá la soldadura entre los aceros a ser soldados. Los electrodos aleados con torio (EWTh) son usados principalmente con DC- debido a que producen excelente iniciación y estabilidad del arco. El electrodo es de 2.4mm de diámetro (3/32 in).

6.3.3.3 Probetas de ensayo

Para la comparación de la soldabilidad entre aceros inoxidable y aceros al carbono, y como se escogió anteriormente los materiales base a utilizar, se tienen las siguientes combinaciones de materiales y codificación de las probetas:

Tabla 6.24 Codificación de las probetas

PROBETAS 1			PROBETAS 3		
AISI 304 (unidades)	SAE 1010 (unidades)	DESIGNACIÓN PROBETA	AISI 304 (unidades)	A-36 (unidades)	DESIGNACIÓN PROBETA
1	1	1 A	1	1	3 A
1	1	1 B	1	1	3 B
1	1	1 C	1	1	3 C
1	1	1 D	1	1	3 D

Se procede a codificar 8 probetas (tabla 6.24, fig. 6.13), siendo 4 probetas con la combinación de un acero AISI 304 con un acero al carbono SAE 1010, y 4 probetas de un acero AISI 304 con un acero estructural ASTM A-36.

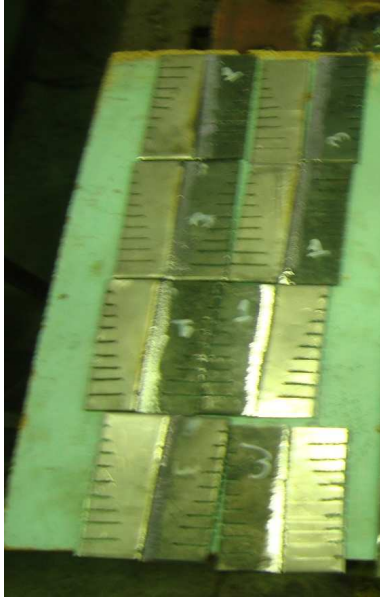


Figura 6.13 Codificación de las probetas utilizadas para el ensayo Houldcroft

6.3.3.4 Procedimiento Experimental

Una vez determinado, el número de probetas y nomenclatura de las mismas se procede a limpiar las caras de los aceros al carbono donde se realizan los cordones de soldadura, para evitar una posible contaminación del arco, esto no se realiza con el acero inoxidable porque se estaría disminuyendo la capa de óxido que protege este acero de la corrosión.

Como se necesita para este ensayo una soldadura a tope, es necesario alinear las probetas, y tener unas juntas a tope lo más paralelas posible, luego de que estas han sido señaladas con su respectivo código.

El cordón de soldadura se realiza mediante un pase (recto), en posición plana (1G), sin técnica de arrastre, la corriente utilizada estuvo en el rango de 104-106A DCEN (corriente continua con electrodo negativo), una tensión de 11-12V, y la velocidad de avance fluctúa entre 99 a 101 mm/min para las probetas ensayadas. En los WPS (Ver Anexo 6), se especifican las variables, condiciones y parámetros de soldadura.

Luego de realizar la soldadura de las ocho probetas, como se muestra en la figura 6.14 (1A, 3A, 1C, etc.) manteniendo siempre un ambiente libre de contaminación para evitar posibles defectos en el charco de soldadura, se almacenan las mismas

en un ambiente libre de corrientes de aire para empezar los análisis de inspección después de 24 horas de terminado el proceso de soldadura.

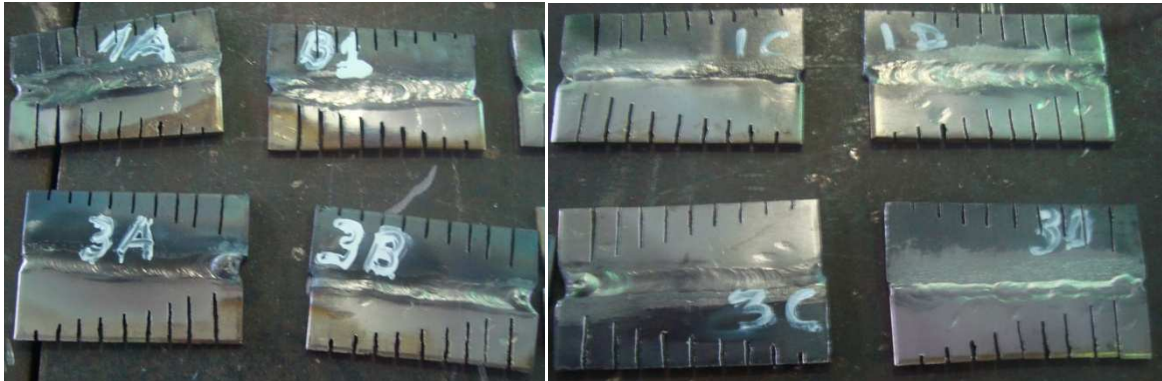


Figura 6.14 Ensayo Houldcroft (Probetas ensayadas)

Todos los datos de los parámetros utilizados en este ensayo son registrados en la respectiva hoja de resultados de prueba del ensayo HOULDCROFT, para cada probeta (ver Anexo 11.1).

6.3.3.5 Proceso de Inspección

Para realizar el análisis de las probetas, en busca de la existencia de fisuras, se espera 24 horas a terminada la soldadura. Los criterios de aceptación o rechazo de las discontinuidades fueron analizadas mediante la norma AWS D1.6, tal y como se analiza para el ensayo Houldcroft.

A continuación se explica cada uno de los métodos de inspección realizados a las diferentes probetas, en el Anexo 11.1 se tienen los registros de los ensayos.

6.3.3.6 Inspección Visual

Con la ayuda de un lente convexo (fig. 6.15), se procede a realizar la inspección visual de todas las probetas, con el objetivo de analizar superficialmente a lo largo de todo el cordón en busca de fisuras, y analizar en base a los criterios de aceptación de discontinuidades que son mencionados en la norma para este tipo de soldadura.



Figura 6.15 Inspección visual de fisuras superficiales

6.3.3.7 Inspección Radiográfica

Para realizar el análisis interno del cordón se procede con la inspección radiográfica, luego de realizar la inspección visual de los cordones, con el objeto de mejorar el análisis de las probetas, y asegurar que no existe ningún defecto que perjudique la soldadura entre estos materiales. (Ver Fig. 6.16)

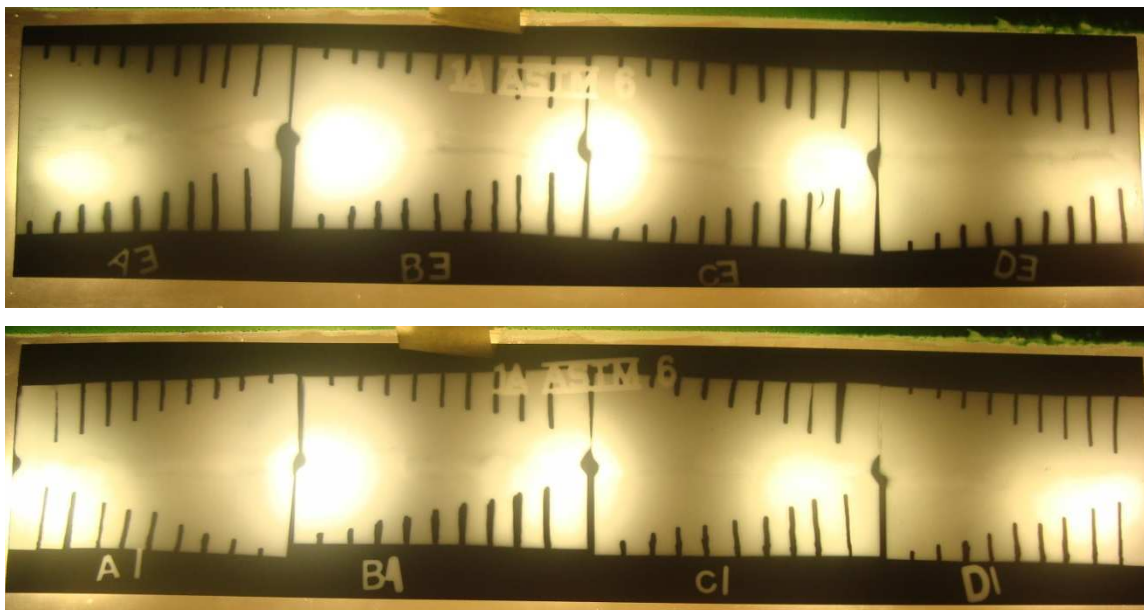


Figura 6.16 Radiografías de las probetas ensayadas

6.3.3.8 Resultados obtenidos

Realizado el proceso de inspección en búsqueda de fisuras producidas por el ensayo HOULDCROFT de soldabilidad, se procede a registrar los datos obtenidos

en cada uno de los procesos de inspección, así como las variables y parámetros utilizados en el proceso de soldadura como lo establecen las normas.

6.3.3.8.1 Resultados de la soldadura de ensayo

La norma, establece que se debe registrar todos los parámetros y variables, usadas en el procedimiento de soldadura de ensayo. Algunos de los parámetros (metal base, espesor del metal base, electrodos, metal de aporte, diámetros del metal de aporte y electrodo, gas de protección) son registrados en el WPS (Anexo 6).

Otras variables importantes como los valores de fuerza aplicada, voltaje, corriente y velocidad, además del valor calculado del calor aportado con estos datos, son registrados en la tabla 6.25.

Tabla 6.25 Parámetros y variables utilizadas para la soldadura de ensayo

PROBETA	V	I	S	t	L	Q	Humedad Relativa	Temperatura Ambiente
	(V)	[A]	[mm/min]	[min]	[mm]	[J/mm]	[%]	[C]
1A	12,3	106	103,91	0,73	76,2	752,85	70	20
1C	12,3	106	95,25	0,80	76,2	821,29	70	20
1D	12,3	106	103,91	0,73	76,2	752,85	70	20
1E	12,3	106	91,44	0,83	76,2	855,51	70	20
3A	12,3	106	99,39	0,77	76,2	787,07	70	20
3C	12,3	106	101,60	0,75	76,2	769,96	70	20
3D	12,3	106	91,44	0,83	76,2	855,51	70	20
3E	12,3	106	97,28	0,78	76,2	804,18	70	20

6.3.3.8.2 Resultados de la inspección de fisuras superficiales

Los resultados obtenidos de la inspección superficial son registrados y analizados en el anexo 11.1. A continuación se resume la presencia o no de fisuras superficiales en cada una de las probetas analizadas para el ensayo de soldabilidad Houldcroft en la tabla 6.26.

Tabla 6.26 Resultados de la presencia de fisuras superficiales

PROBETA	PRESENCIA DE FISURAS		
	INSPECCION VISUAL	CANTIDAD DE FISURAS	LONGITUD DE FISURAS [mm]
1 A	SI	NO	
1C	SI	NO	
1D	SI	NO	
1E	SI	NO	
3 A	SI	NO	
3C	SI	NO	
3D	SI	NO	
3E	SI	NO	

6.3.3.8.3 *Resultados de la inspección radiográfica*

Los resultados de la inspección radiográfica y los parámetros utilizados para realizar esta inspección, se detallan para cada probeta en el anexo 11.2. Estas radiografías fueron inspeccionadas mediante un negatoscopio, para posteriormente ser analizadas bajo los criterios de la norma AWS D1.6 (criterios de aceptación o rechazo de discontinuidades, en caso de existir).

En la tabla 6.27 se resume los resultados obtenidos al realizar la inspección radiográfica a las probetas del ensayo de soldabilidad Houldcroft.

Tabla 6.27 Resultados obtenidos de la inspección radiográfica

PROBETA	DISCONTINUIDADES EN LAS RADIOGRAFIAS				Descripción
	Fisuras		Otra discontinuidad		
1 A	SI	NO	SI	NO	
1B	SI	NO	SI	NO	FALTA DE PENETRACION
1C	SI	NO	SI	NO	
1D	SI	NO	SI	NO	
3 A	SI	NO	SI	NO	
3B	SI	NO	SI	NO	
3C	SI	NO	SI	NO	FALTA DE PENETRACION
3D	SI	NO	SI	NO	

6.3.3.9 **Análisis Suplementarios**

La norma, no estipula algún otro ensayo de los ya realizados, pero para un mejor análisis de la soldabilidad que presentaron las probetas soldadas con el proceso

GTAW sin material de aporte se procedió a realizar las curvas de enfriamiento y análisis metalográfico.

6.3.3.9.1 Temperaturas de enfriamiento

Posteriormente a los ensayos ya estudiados anteriormente se procedió a un análisis de la variación de la temperatura de enfriamiento, para la probeta tipo “1C” y “3 A”, para posteriormente ser comparada con el otro ensayo de soldabilidad. Para la medición de las temperaturas se procedió a utilizar un pirómetro (marca “FLUKE” 68). Las mediciones se realizaron a una distancia de 10mm del eje axial del cordón de soldadura, en el cual posiblemente se encuentra localizada la ZAC; dichas mediciones de temperatura se realizaron cada 60 segundos, hasta que la temperatura se estabilice; en cada uno de los materiales bases. Los datos obtenidos de las temperaturas de enfriamiento se pueden observar en la tabla 6.28. Los gráficos representativos de la variación de la temperatura de enfriamiento se puede observar en la figura 6.17.

Tabla 6.28 Curva de enfriamiento del ensayo HOULDCROFT

TIEMPO [MIN]	TEMPERATURA 1C [°C]		TEMPERATURA 3A [°C]	
	SAE 1010	AISI 304	ASTM A-36	AISI 304
1	370	285	325,3	276,8
2	260,2	115,4	286,2	154,6
3	115,7	95,3	199,6	100,7
4	68	68,6	120,3	74,8
5	65,6	60,1	78	56,7
6	43,2	45,6	74	43,6
7	41,4	40,2	46,4	42,2
8	38,8	38,2	45,4	39
9	35	34,4	38,6	33,6
10	30	30,2	36,2	33,4
11	25,4	28	30,2	28,4
12	24,7	25,4	26	27,4
13	24	24,3	25,4	26,2
14	24	24	24,7	24,2
15	24	24	24	24

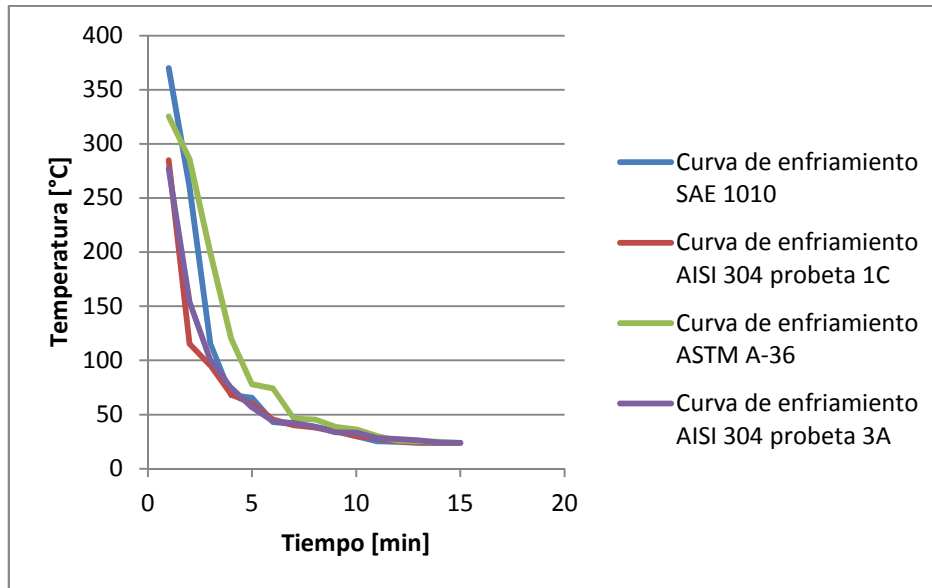


Figura 6.17 Curvas de enfriamiento del ensayo HOULDCROFT

6.3.3.9.2 Análisis Metalográfico

Para el análisis metalográfico se decide realizar, únicamente a las probetas 1B, 1C, 3 A, 3C, que son las probetas que poseen buena penetración y falta de penetración, y que no presentan ningún tipo de discontinuidad superficial. Este análisis se lo realiza con el objeto de observar el estado interno del cordón de soldadura, la ZAC, y encontrar posibles fisuras internas. (Figura 6.18)



Figura 6.18 Probetas para ensayo metalográfico

El análisis metalográfico se lo realiza en dos partes: un análisis preliminar mediante macrografías a 10X, en las cuales las muestras fueron desbastadas,

pulidas (con material abrasivo fino), y atacadas con Nital al 2%(aceros al carbono) y Marble (aceros inoxidables).

El segundo análisis se realiza mediante micrografías con aumentos a 100X y 500X, en las cuales las muestras fueron pulidas en paño con alúmina, con el objeto de tener una superficie sin imperfecciones, y posteriormente atacadas con Nital al 2%(aceros al carbono) y Marble (aceros inoxidables).

El análisis del acero inoxidable, se lo realizó una sola vez, detallado en el ensayo de soldabilidad Varestraint.

6.3.3.9.3 Análisis Macrográfico

Las macrografías se realizan en las cuatro probetas antes mencionadas en el punto 6.3.3.9.2, con el objeto de comprobar la distribución de defectos como grietas superficiales, rechupes, partes soldadas.

Las macrografías de las diferentes muestras se pueden observar en las tablas 6.29, 6.30, 6.31 y 6.32.

Tabla 6.29 Análisis macrográfico con aumento 10X de la muestra 1C

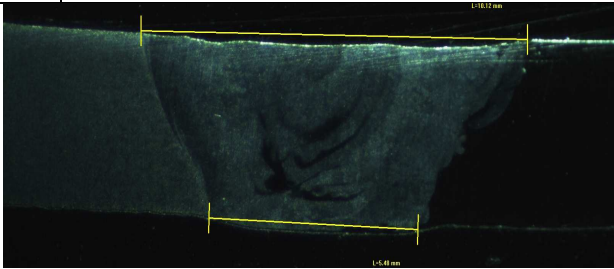
Material (a)	Material (b)	Proceso	Temperatura de precalentamiento	Observaciones	Tipo de Discontinuidad	Tamaño de la discontinuidad
						
SAE1010	AISI 304	GTAW	Ambiente	Se observa un cordón de soldadura con fusión completa entre el metal base y el cordón de soldadura, con penetración en la raíz, óxidos atrapados en el cordón y sin presencia de discontinuidades.	Ninguna	-----

Tabla 6.30 Análisis macrográfico con aumento 10X de la muestra 1B

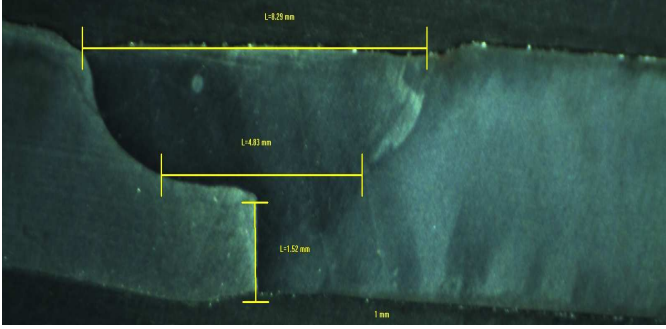
Material (a)	Material (b)	Proceso	Temperatura de precalentamiento	Observaciones	Tipo de Discontinuidad	Tamaño de la discontinuidad
						
SAE1010	AISI 304	GTAW	Ambiente	Se observa un cordón de soldadura con fusión incompleta entre el metal base y el cordón de soldadura, y sin presencia de discontinuidades.	Falta de penetración	1,52mm

Tabla 6.31 Análisis macrográfico con aumento 10X de la muestra 3 A

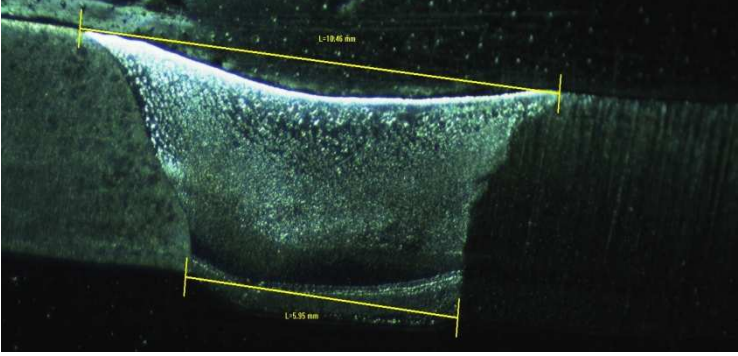
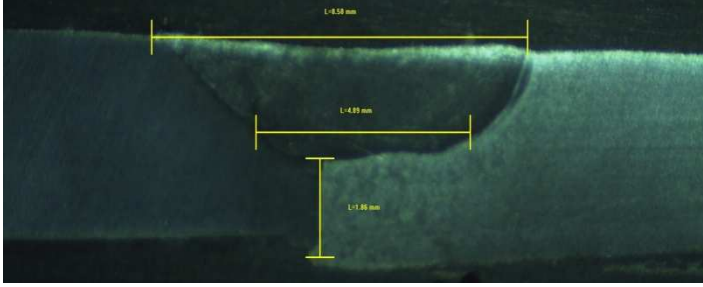
Material (a)	Material (b)	Proceso	Temperatura de precalentamiento	Observaciones	Tipo de Discontinuidad	Tamaño de la discontinuidad
						
ASTM A-36	AISI 304	GTAW	Ambiente	Se observa un cordón de soldadura con fusión completa entre el metal base y el cordón de soldadura, y sin presencia de discontinuidades.	Ninguna	-----

Tabla 6.32 Análisis macrográfico con aumento 10X de la muestra 3C

Material (a)	Material (b)	Proceso	Temperatura de precalentamiento	Observaciones	Tipo de Discontinuidad	Tamaño de la discontinuidad
						
ASTM A-36	AISI 304	GTAW	Ambiente	Se observa un cordón de soldadura con fusión incompleta entre el metal base y el cordón de soldadura, y sin presencia de discontinuidades.	Falta de penetración	1,86mm

6.3.3.9.4 Análisis Micrográfico

Luego de que las probetas hayan pasado por el análisis micrográfico, se procede con el análisis micrográfico, con el objeto de observar características estructurales, deducir posibles variaciones que experimentan las propiedades mecánicas de los metales base luego del proceso de soldadura.

Las micrografías de las diferentes muestras se pueden observar en las tablas 6.33, 6.34, 6.35 y 6.36.

Tabla 6.33 Micrografías de la muestra 1C

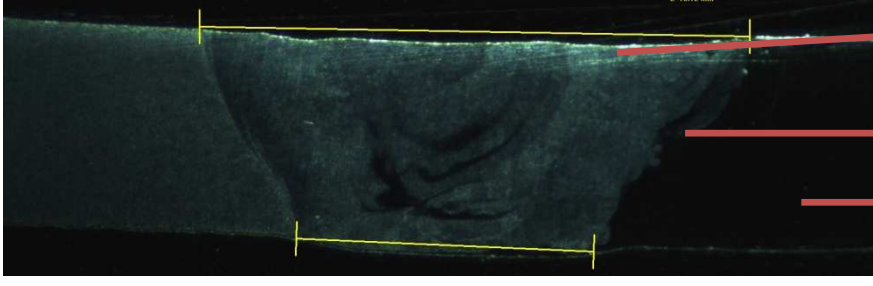
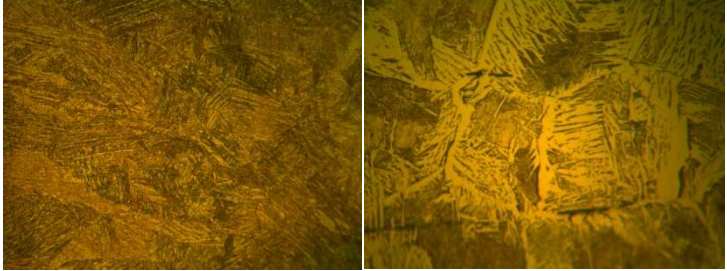
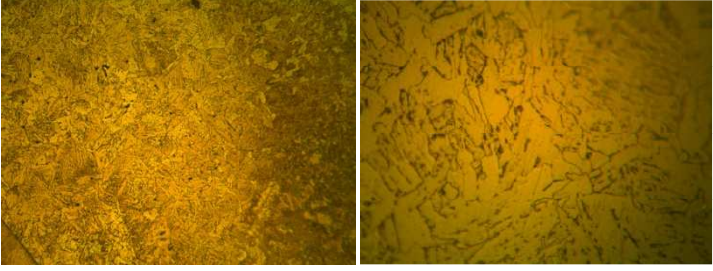
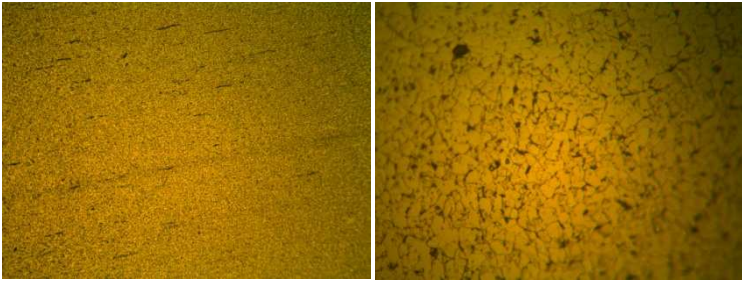
	<p>→ Cordón de soldadura</p> <p>→ ZAC</p> <p>→ Material base</p>
 <p>1. Micrografía del cordón de soldadura; Izquierda 100X; Derecha 500X</p>	 <p>2. Micrografía de la ZAC; Izquierda 100X; Derecha 500X</p>
 <p>3. Micrografía del material base; Izquierda 100X; Derecha 500X</p>	

Tabla 6.34 Micrografías de la muestra 1B

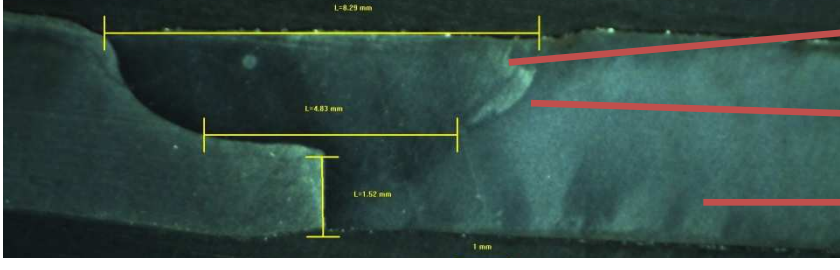
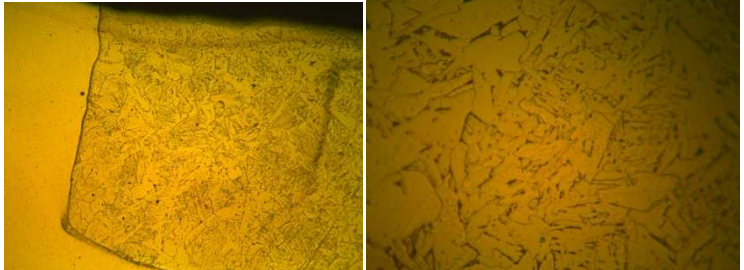
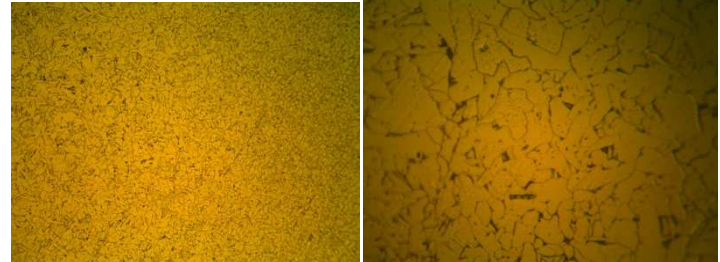
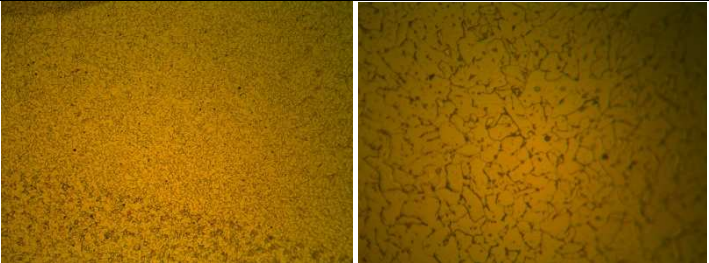
	<p>Cordón de soldadura</p> <p>ZAC</p> <p>Material base</p>
 <p>1. Micrografía del cordón de soldadura; Izquierda 100X; Derecha 500X</p>	 <p>2. Micrografía de la ZAC; Izquierda 100X; Derecha 500X</p>
 <p>3. Micrografía del material base; Izquierda 100X; Derecha 500X</p>	

Tabla 6.35 Micrografías de la muestra 3 A

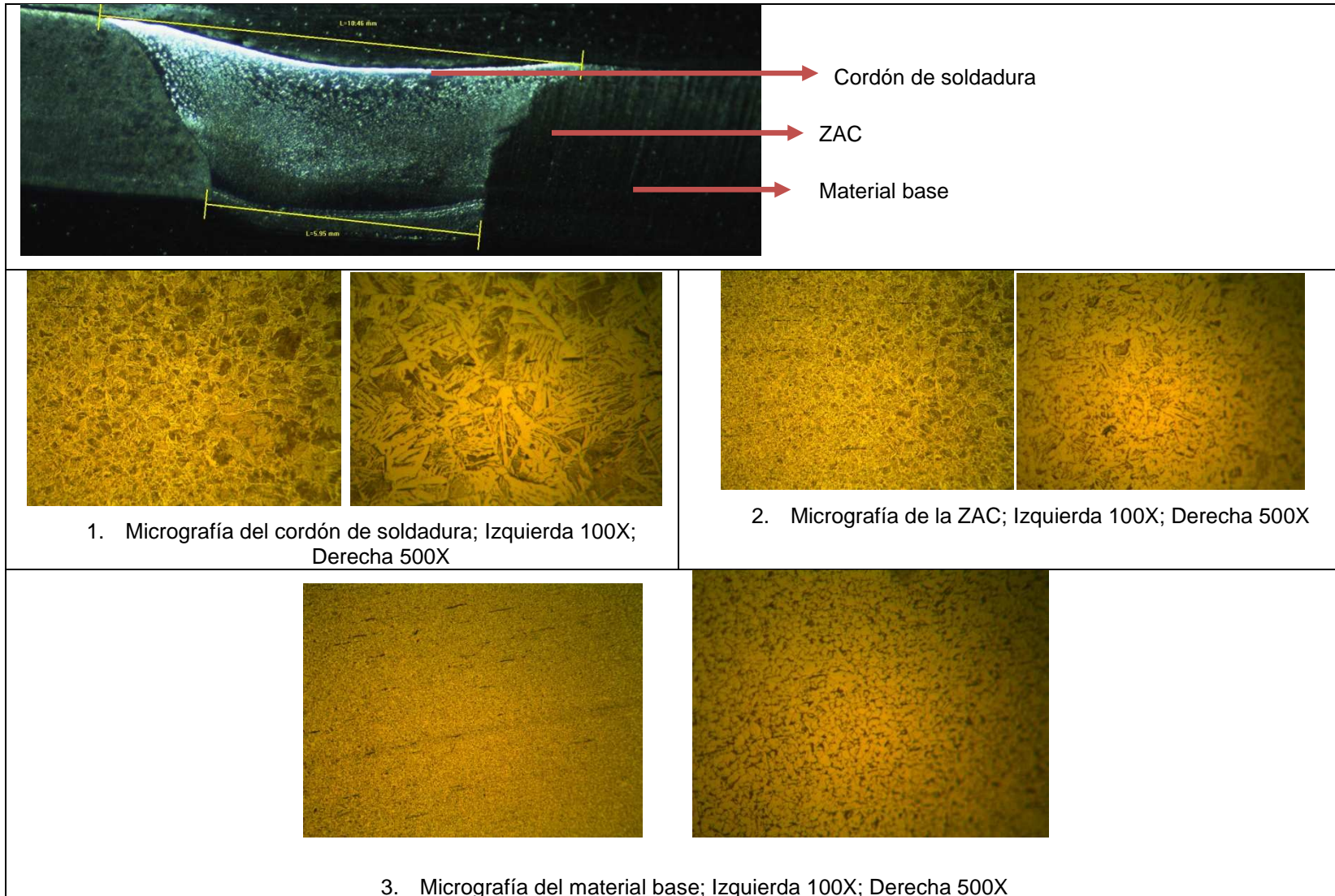
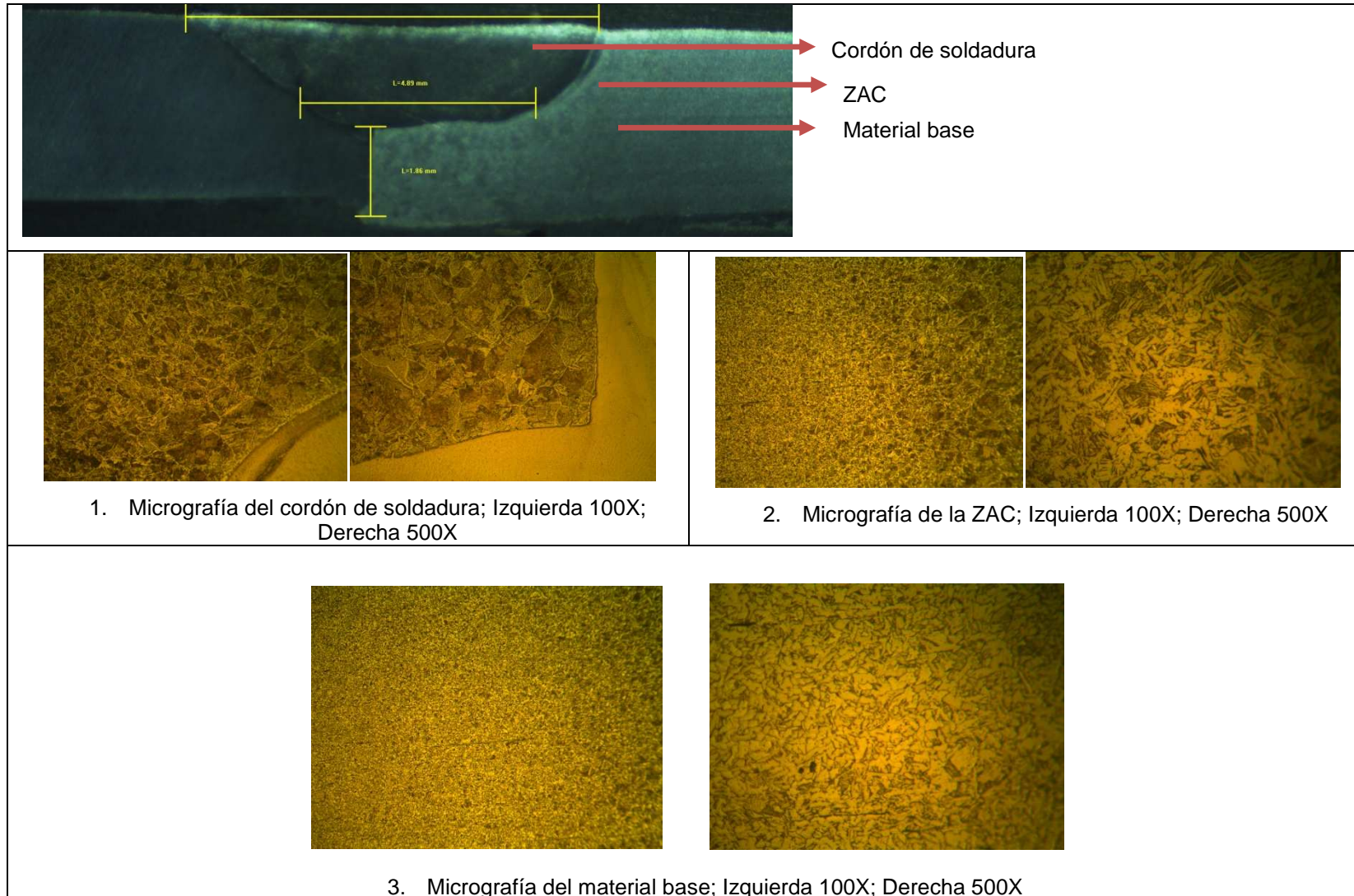


Tabla 6.36 Micrografías de la muestra 3C



6.3.4 ENSAYOS SUPLEMENTARIOS

Los ensayos suplementarios corresponden a ensayos destructivos realizados a los dos tipos de probetas que se han analizado anteriormente mediante los ensayos de soldabilidad Houldcroft y Varestraint, es decir se detallan a continuación los ensayos de doblado de cara y raíz, y principalmente el ensayo de tracción a la soldadura entre un acero inoxidable AISI 304 con un acero al carbono SAE-1010, y la soldadura entre un acero inoxidable AISI 304 con un acero estructura A-36. Estos ensayos son adicionales a los requeridos por la norma que rige los ensayos de soldabilidad, pero son importantes para conocer el estado y características esenciales de los cordones de soldadura, como por ejemplo la resistencia mecánica del cordón de soldadura para cada tipo de probeta ensayada.

Los ensayos destructivos para este tipo de materiales se rigen bajo la norma AWS D1.6:1999 Structural Welding Code-Stainless Steel. La cual especifica los ensayos que se deben realizar dependiendo del espesor de los materiales utilizados en la soldadura, el tamaño de las probetas a ser ensayadas y los criterios de aceptación de dichos ensayos.

6.3.4.1 Material base

De igual manera que para los ensayos de soldabilidad se utilizan dos láminas de acero inoxidable AISI 304, la primera será soldada con un acero estructural ASTM A-36, y la otra con un acero SAE 1010 como se detalla en el punto 6.1, cuyas dimensiones se rigen en la norma en mención por la AWS, en la D1.6:1999 Structural Welding Code-Stainless Steel. (Ver fig. 6.19).

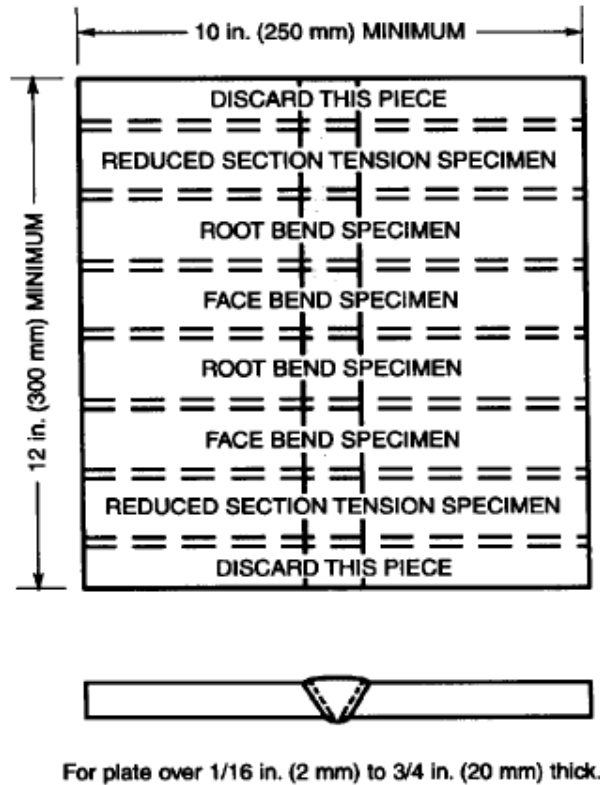


Figura 6.19 Dimensiones y Ubicaciones de las probetas para Ensayos Destructivos⁹⁸

6.3.4.2 Electrodo

Como se realizan los ensayos destructivos bajo los mismos parámetros de soldadura que los ensayos de soldabilidad, se utiliza un electrodo no consumible para proceso GTAW, siendo este electrodo el EWTh-2 como lo establece la norma AWS D1.6 y AWS A.5.12 para soldar aceros inoxidables, los electrodos aleados con torio (EWTh) son usados con DC- debido a que producen excelente iniciación y estabilidad del arco. El electrodo es de 2.4mm de diámetro (3/32 in).

⁹⁸ Aws; (1999); "AWS. D1.6:1999 Structural Welding Code-Stainless Steel"; American welding society; pág. 105.

6.3.4.3 Probetas de ensayo

Se va analizar la soldadura de un acero inoxidable AISI 304 con un acero al carbono SAE 1010, y la soldadura de un acero inoxidable AISI 304 con un acero estructural A-36, para determinar las características mecánicas de los cordones de soldadura utilizados en los ensayos de soldabilidad Houldcroft y Varestraint. Por lo que el procedimiento de soldadura y los parámetros de este proceso van a ser los mismos que para los ensayos de soldabilidad analizados anteriormente.

Es decir el proceso previo de limpieza es el mismo, se necesita alinear las probetas para tener una soldadura a tope.

El cordón de soldadura para cada tipo de unión que se requiere, se realiza mediante un pase (recto), en posición plana (1G), sin técnica de arrastre, la corriente utilizada estuvo en el rango de 104-106A DCEN (corriente continua con electrodo negativo), una tensión de 11-12V, y la velocidad de avance fluctúa entre 99 a 101 mm/min para los dos cordones de soldadura.

En los WPS (Ver Anexo 7), se especifican las variables, condiciones y parámetros de soldadura.

Para el análisis de la soldadura entre aceros inoxidables y aceros al carbono, y como se escogió anteriormente la ubicación de las probetas que la norma establece (Ver figura 6.19), se tienen las siguientes combinaciones de materiales y codificación de las probetas para los ensayos destructivos a realizarse en los cordones de soldadura realizados para este tipo de ensayos. Cabe mencionar que todas las probetas tienen las mismas dimensiones, es decir la soldadura que se tiene se divide en 8 partes iguales, según lo establecido por la norma AWS D1.6.

Tabla 6.37 Codificación Probetas

PROBETAS SAE 1010			PROBETAS A -36		
AISI 304 (unidades)	SAE 1010 (unidades)	DESIGNACIÓN PROBETA	AISI 304 (unidades)	A-36 (unidades)	DESIGNACIÓN PROBETA
1	1	1	1	1	1
1	1	T 2	1	1	T 2
1	1	DR 3	1	1	DR 3
1	1	DC 4	1	1	DC 4
1	1	DR 5	1	1	DR 5
1	1	DC 6	1	1	DC 6
1	1	T 7	1	1	T 7
1	1	8	1	1	8

Se procede a codificar 16 probetas (tabla 6.37), siendo 8 probetas con la combinación de un acero AISI 304 con un acero al carbono SAE 1010, y 8 probetas de un acero AISI 304 con un acero estructural ASTM A-36.

6.3.4.4 Procedimiento Experimental

Luego de realizar la codificación de las 8 probetas (dimensiones iguales) para cada tipo de unión que se tiene, y cada tipo de ensayo que se debe realizar, se procede a cortar todas las probetas, adicionalmente las probetas número 1 y número 8 tanto para las de acero SAE 1010 y para las del ASTM A-36 son descartadas según la norma para cualquier tipo de ensayo, por lo que únicamente se trabajara con las 12 probetas restantes, 6 para la combinación de un acero AISI 304 con un acero al carbono SAE 1010, y 6 probetas de un acero AISI 304 con un acero estructural ASTM A-36. Teniendo dos probetas de cada combinación para un mismo ensayo, por ejemplo las probetas número 3 y 5 serán para realizar ensayos de doblado de raíz.

6.3.4.4.1 Ensayo de Tracción

Es el ensayo destructivo más importante, y el que nos da a conocer la resistencia que tiene el cordón de soldadura, que es lo que nos permite saber si el cordón de soldadura puede o no resistir condiciones de trabajo iguales o mayores que los metales base.

El ensayo consiste en someter a la probeta de sección uniforme y conocida, a una fuerza de tracción que va aumentando progresivamente, según se va incrementando la fuerza también se va midiendo los correspondientes alargamientos de la probeta, mediciones que nos permiten obtener la curva característica de la probeta, mediante la curva esfuerzo vs deformación (fig. 6.20).

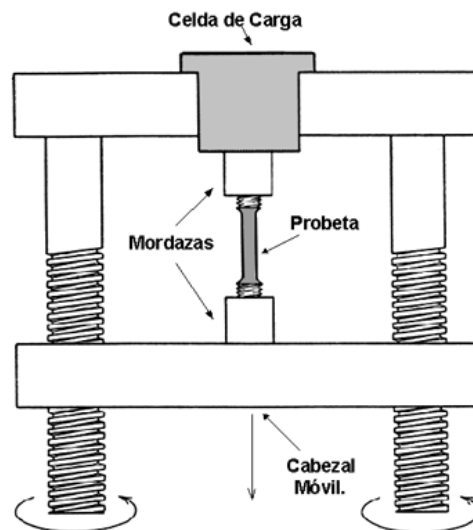


Figura 6.20 Esquema de un Ensayo de Tracción⁹⁹

Las etapas de esta curva inician con la deformación elástica del material, en donde al retirar la fuerza aplicada, el material regresa a su condición original. Se dice que el material sobrepasó su límite elástico cuando la magnitud de la fuerza y por ende de la carga es suficiente para iniciar una deformación plástica, es decir una vez que se retire la carga el material no regresa a su condición inicial (longitud inicial). Cuando el esfuerzo alcanza su valor máximo este representa la

⁹⁹ <http://www2.ing.puc.cl/~icm2312/apuntes/materiales/materials3.html>

resistencia máxima a la tensión. Debido al valor del esfuerzo, se forma en la probeta una restricción o cuello, la cual es una reducción localizada en el área de la sección transversal, en la que se concentra todo el alargamiento posterior. Una vez formado el cuello, el esfuerzo disminuye al aumentar la deformación y continúa disminuyendo hasta que la probeta se rompe.

Este ensayo se realizó en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Escuela Politécnica Nacional bajo el código ASME SECCION IX, al cual se envió 4 probetas (muestras) a ser analizadas, estas son las probetas T2 y T7 tanto para la junta soldada entre un acero AISI 304 y un SAE 1010, como para la junta soldada entre un acero AISI 304 y un ASTM A-36.

6.3.4.4.2 Ensayo de Doblado

Tanto el doblado de cara como el de raíz, nos muestra el comportamiento de un material, y en este caso del cordón de soldadura frente a esfuerzos de flexión, cuando está solicitada por fuerzas que tienden a curvar su eje longitudinal, en este caso se ha decidido realizar este ensayo sin que ninguna norma de las que rigen los ensayos de soldabilidad utilizados anteriormente mencione o solicite que se realice, debido a que en el Laboratorio de Soldadura de la Escuela Politécnica Nacional se dispone de una máquina que permite realizar estos ensayos, y que ya se obtuvieron las probetas en la codificación o división de probetas para realizar el ensayo de tracción, se procede a realizar los doblados de cara y de raíz para las probetas DR 3, DC 4, DR 5, DC 6 tanto para la junta soldada entre un acero AISI 304 y un SAE 1010, como para la junta soldada entre un acero AISI 304 y un ASTM A-36. (Ver fig. 6.21).



Figura 6.21 Esquema de un Ensayo de Doblado¹⁰⁰

El doblado de cara, muestra el comportamiento de la parte superior del cordón de soldadura ante el ensayo de doblado, es decir si se quiere observar que existe algún defecto en la cara del cordón, mientras que el de raíz permite observar si existe algún defecto en la parte inferior del cordón de soldadura, como su nombre lo indica en la raíz del cordón.

6.3.4.5 Resultados Obtenidos

6.3.4.5.1 Resultados del Ensayo de Tracción

Los resultados obtenidos en el ensayo de tracción se pueden representar de manera gráfica, mediante la curva esfuerzo vs porcentaje de deformación de cada probeta ensayada. El informe Técnico del ensayo de tracción facilitado por el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos de la Escuela Politécnica Nacional se encuentra en el Anexo 16.

¹⁰⁰ <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2005/bmfic744e/doc/bmfic744e.pdf>

Un resumen de los resultados y datos necesarios para el ensayo de tracción de las 4 probetas ensayadas, se presenta en la tabla 6.38.

Tabla 6.38 Resistencia a la tracción de las probetas ensayadas

Identificación	Ancho Promedio	Espesor Promedio	Carga máxima soportada		Resistencia a la tracción		Observaciones
	mm	mm	lbf	N	ksi	MPa	
T2 - A36	19,11	2,24	5.880	26.19 3	88,7	612	FMB
T7 - A36	19,25	2,69	5.410	24.09 9	67,4	465	FMB
T2 - SAE 1010	17,59	3,2	4.045	18.02 1	46,4	320	FMB
T7 - SAE1010	19,44	2,8	4.930	21.96 1	58,5	403	FMB

❖ FMB: Falla en el material base

Las gráficas esfuerzo vs deformación que se tiene para cada probeta, se presentan a continuación.

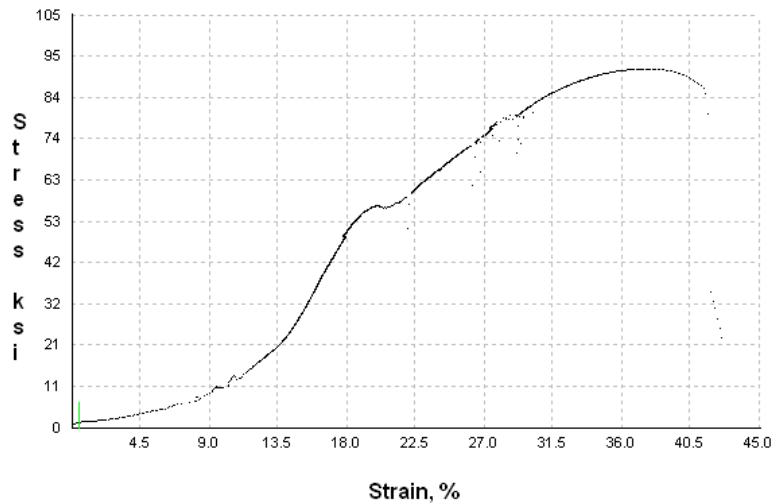


Figura 6.22 Curva de esfuerzo vs deformación de la probeta T2 – A36

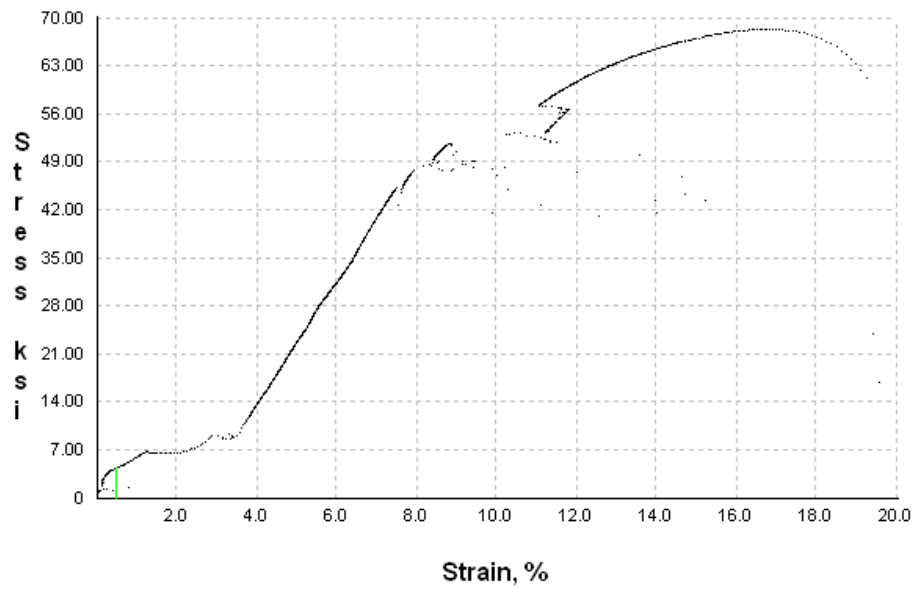


Figura 6.23 Curva de esfuerzo vs deformación de la probeta T7 – A36

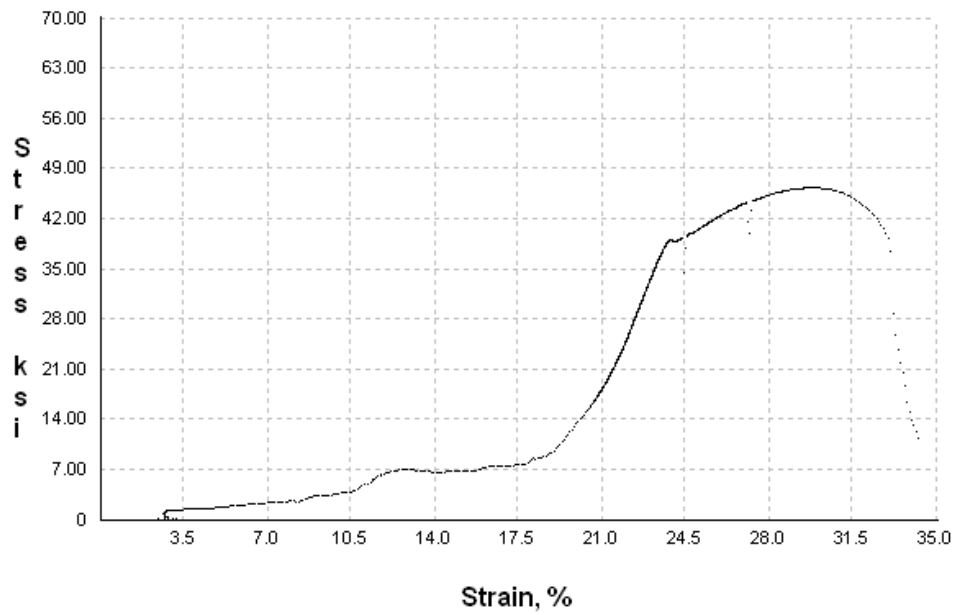


Figura 6.24 Curva de esfuerzo vs deformación de la probeta T2 – SAE1010

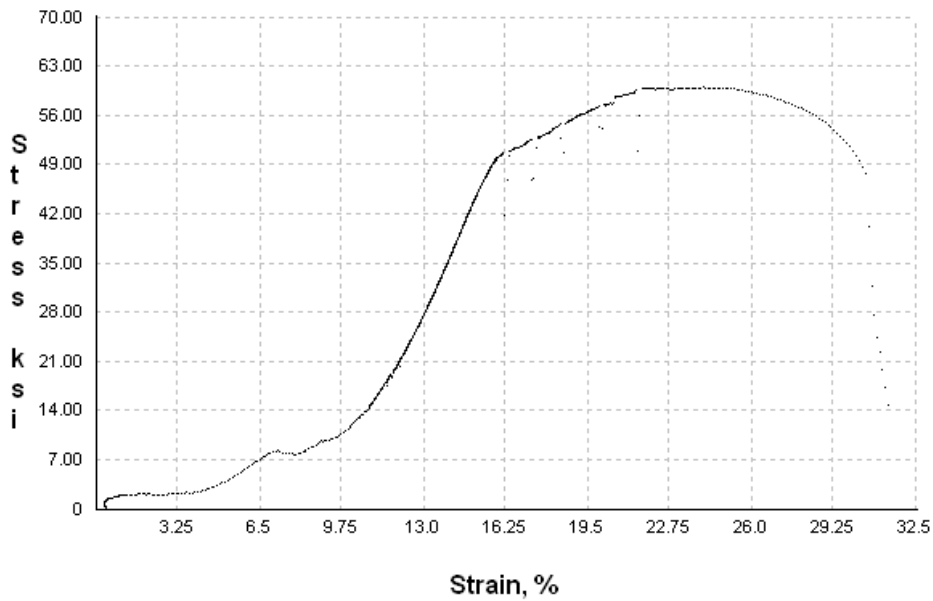


Figura 6.25 Curva de esfuerzo vs deformación de la probeta T7 – SAE1010

6.3.4.5.2 *Resultados del Ensayo de Doblado*

Los resultados de los ensayos de doblado realizados a las 8 probetas ensayadas se resumen en la tabla 6.39.

Tabla 6.39 Resultados del ensayo de doblado

Identificación	Doblado		Discontinuidades encontradas				Observaciones
	Cara	Raíz	Fisuras		Otras Discontinuidades		
DR 3 - A36		X	SI	NO	SI	NO	No se observan Discontinuidades
DC 4 - A36	X		SI	NO	SI	NO	No se observan Discontinuidades
DR 5 - A36		X	SI	NO	SI	NO	No se observan Discontinuidades
DC 6 - A36	X		SI	NO	SI	NO	No se observan Discontinuidades
DR 3 – SAE1010		X	SI	NO	SI	NO	No se observan Discontinuidades
DC 4 – SAE1010	X		SI	NO	SI	NO	No se observan Discontinuidades
DR 5 – SAE1010		X	SI	NO	SI	NO	No se observan Discontinuidades
DC 6 – SAE1010	X		SI	NO	SI	NO	No se observan Discontinuidades

6.3.5 TEMPERATURA DE PRECALENTAMIENTO

Para el proceso experimental de soldadura en planchas de acero ASTM A-36, SAE 1010 Y AISI 304 con espesor de 3mm se estableció realizar los ensayos a temperatura ambiente, pero al observar la presencia de martensita en algunas metalografías realizadas en los ensayos anteriores se decidió realizar la soldadura de probetas precalentadas.

El precalentamiento en aceros estructurales ASTM A-36 y SAE 1010 no es necesario como lo establece la norma AWS D1.1 (Norma para estructuras soldadas en acero)¹⁰¹, mientras que la norma AWS D1.6 establece que a los aceros austeníticos no deben ser precalentados a más de 120°C ya que precipitan, se procedió a realizar el cálculo mediante el criterio de Seferian; con el cual se obtuvo una temperatura de precalentamiento de 520°C para el acero inoxidable (Ver Anexo 4). Por lo que para este proceso experimental de soldadura se procedió a precalentar las probetas a 300°C, temperatura que fue seleccionada entre la temperatura calculada y la de precipitación del acero inoxidable.

Cabe resaltar que la norma AWS B4.0 M, no hace referencia a la necesidad de realizar un precalentamiento a las probetas; por lo tanto para el ensayo VARESTRAINT no se realizará algún tipo de precalentamiento, al igual que para el ensayo HOULDCROFT.

6.3.5.1 Material base

Para estas probetas de ensayo se utilizan dos láminas de acero inoxidable AISI 304, las cuales serán soldadas con un acero estructural ASTM A-36, y también con un acero SAE 1010 como se detalla en el punto 6.1, cuyas dimensiones son 100X45X3mm como se puede ver en la figura 6.26.

¹⁰¹ AMERICAN WELDING SOCIETY; (2008); "AWS D1.1, Structural Welding Code-Steel"; AWS; Miami; pág. 68.

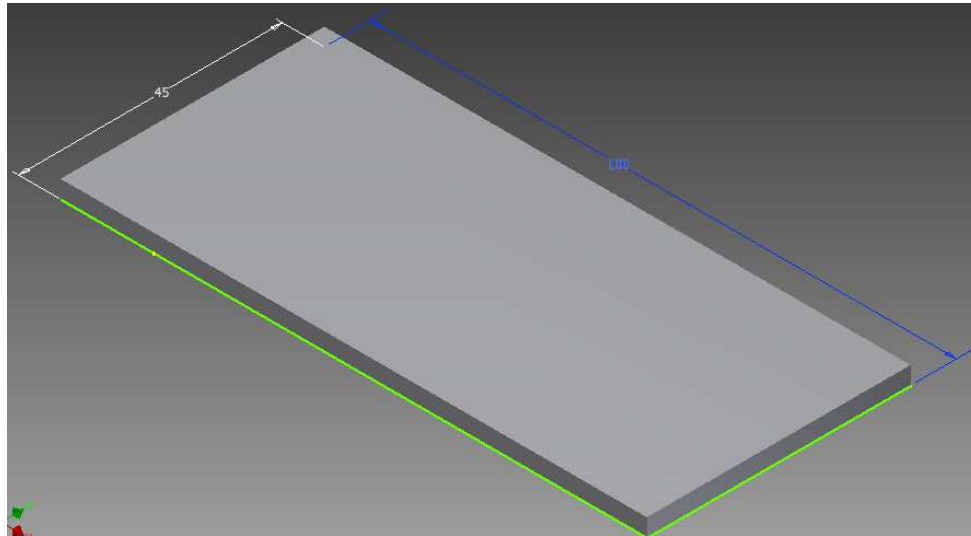


Figura 6.26 Material base para las probetas

La composición química de los metales base utilizados en la elaboración de las probetas se la detalla en la tabla 6.9.

6.3.5.2 Electrodo

Debido a que se realiza una soldadura sin material de aporte, se utiliza un electrodo no consumible para proceso GTAW, siendo este electrodo el EWTh-2 como lo establece la norma AWS D1.6 y AWS A.5.12 para soldar aceros inoxidable. Esto dado a que entre los dos aceros disimiles a soldar, el material más crítico o que regirá será el inoxidable. Los electrodos aleados con torio (EWTh) son usados principalmente con DC- debido a que producen excelente iniciación y estabilidad del arco. El electrodo es de 2.4mm de diámetro (3/32 in).

6.3.5.3 Probetas de ensayo

Para la comparación de la soldabilidad entre aceros inoxidable y aceros al carbono, y como se escogió anteriormente los materiales base a utilizar, se tiene las siguientes combinaciones de materiales:

Tabla 6.40 Codificación probetas

PROBETAS 1			PROBETAS 3		
AISI 304 (unidades)	SAE 1010 (unidades)	DESIGNACIÓN PROBETA	AISI 304 (unidades)	A-36 (unidades)	DESIGNACIÓN PROBETA
1	1	P1	1	1	P3

Se procede a codificar 2 probetas (tabla 6.40), siendo 1 probeta con la combinación de un acero AISI 304 con un acero al carbono SAE 1010, y 1 probeta de un acero AISI 304 con un acero estructural ASTM A-36.

6.3.5.4 Procedimiento Experimental

Una vez determinado, el número de probetas y nomenclatura de las mismas se procede a maquinar las caras de los aceros al carbono donde se realizan los cordones de soldadura, para evitar una posible contaminación del arco.

Una vez señaladas las probetas, se procede a precalentar en el horno de mufla las probetas a 300°C, luego se procede a alinear la s caras a ser soldadas, siendo lo más paralelas posibles, debido al proceso que se realiza sin material de aporte, es decir se debe soldar con una junta a tope.

El cordón de soldadura se realiza mediante un pase (recto), en posición plana (1G), sin técnica de arrastre, la corriente utilizada fue de 106A DCEN (corriente continua con electrodo negativo), una tensión de 11V, y la velocidad de avance fluctúa entre 99 a 101 mm/min para las probetas ensayadas.

En los WPS (Ver Anexo 8), se especifican las variables, condiciones y parámetros de soldadura.

Luego de realizar la soldadura de las dos probetas (P1 y P3, fig. 6.27) manteniendo siempre un ambiente libre de contaminación para evitar posibles defectos en el charco de soldadura, se almacenan las mismas en un ambiente libre de corrientes de aire para empezar los análisis de inspección después de 24 horas de terminado el proceso de soldadura.



Figura 6.27 Probetas ensayadas

Todos los datos de los parámetros utilizados en este ensayo son registrados en la respectiva hoja de resultados de prueba para cada probeta (ver Anexo 13.1).

6.3.5.5 Proceso de Inspección

Como se explica anteriormente la inspección de los cordones de soldadura se realiza 24 horas después de culminada la etapa de soldadura del ensayo, en busca de la existencia de fisuras. Los criterios de aceptación o rechazo de las discontinuidades fueron analizadas mediante la norma AWS D1.6

A continuación se explica cada uno de los métodos de inspección realizados a las diferentes probetas recomendados por la norma, además de ensayos adicionales, en el Anexo 13.1 se tienen los registros de los ensayos.

6.3.5.6 Inspección Visual

Con la ayuda de un lente convexo, se procede a realizar la inspección visual de todas las probetas, con el objetivo de analizar superficialmente a lo largo de todo el cordón en busca de fisuras, y analizar en base a los criterios de aceptación de discontinuidades en la soldadura.



Figura 6.28 Inspección visual de fisuras superficiales

6.3.5.7 Resultados obtenidos

Realizado el proceso de inspección en búsqueda de fisuras producidas en la soldadura, se procede a registrar los datos obtenidos en cada uno de los procesos de inspección, así como las variables y parámetros utilizadas en el proceso de soldadura.

6.3.5.7.1 . Resultados de la soldadura de ensayo

Se registran todos los parámetros y variables, usadas en el procedimiento de soldadura de ensayo. Algunos de los parámetros (metal base, espesor del metal base, electrodos, metal de aporte, diámetros del metal de aporte y electrodo, gas de protección) son registrados en el WPS (Anexo 8).

Otras variables importantes como los valores de voltaje, corriente y velocidad, además del valor calculado del calor aportado con estos datos, son registrados en la tabla 6.41.

Tabla 6.41 Parámetros y variables utilizadas para la soldadura de ensayo

PROBETA	V	I	S	t	L	Q	Humedad Relativa	Temperatura Ambiente
	(V)	[A]	[mm/min]	[min]	[mm]	[J/mm]	[%]	[C]
P1	12,3	106	100,00	1,00	100	782,28	70	20
P3	12,3	106	86,96	1,15	100	899,62	70	20

6.3.5.7.2 Resultados de la inspección de fisuras superficiales

Los resultados obtenidos de la inspección superficial son registrados y analizados en el anexo 13.1. A continuación se resume la presencia o no de fisuras superficiales en cada una de las probetas analizadas en la tabla 6.42.

Tabla 6.42 Resultados de la presencia de fisuras superficiales

PROBETA	PRESENCIA DE FISURAS		
	INSPECCION VISUAL	CANTIDAD DE FISURAS	LONGITUD DE FISURAS [mm]
P1	SI	NO	
P3	SI	NO	

6.3.5.8 Análisis Suplementarios

Para un mejor análisis de la soldabilidad que presentaron las probetas soldadas con el proceso GTAW sin material de aporte se procedió a realizar las curvas de enfriamiento y análisis metalográfico.

6.3.5.8.1 Temperatura de enfriamiento

Posteriormente a análisis ya estudiados anteriormente se procedió a un análisis de la variación de la temperatura de enfriamiento, para las dos probetas, para posteriormente ser comparada con las de los otros ensayos de soldabilidad. Para la medición de las temperaturas se procedió a utilizar un pirómetro (marca "FLUKE" 68). Las mediciones se realizaron a una distancia de 10mm del eje axial del cordón de soldadura, en el cual posiblemente se encuentra localizada la ZAC; dichas mediciones de temperatura se realizaron cada 60 segundos, hasta que la temperatura se estabilice; en cada uno de los materiales bases. Los datos obtenidos de las temperaturas de enfriamiento se pueden observar en la tabla 6.43. Los gráficos representativos de la variación de la temperatura de enfriamiento se puede observar en la figura 6.29.

Tabla 6.43 Curva de enfriamiento probetas precalentadas

TIEMPO [MIN]	TEMPERATURA P1 [°C]		TEMPERATURA P3 [°C]	
	SAE 1010	AISI 304	ASTM A-36	AISI 304
1	359	329	360	211
2	289	209	286	188
3	233	120	253	155
4	193	110,3	216	124
5	150,4	92,6	179	112
6	125,2	85,8	153	107
7	107,4	80,2	132	92,6
8	92,6	74,7	110,2	77,8
9	84	70,8	95,2	65,2
10	69	62,4	88,6	61
11	56	51,6	74,2	45
12	48	44,6	61,8	40,2
13	41	40	58	36
14	37	35	49	30
15	31	29	40	26
16	28	26	36	23
17	25	23	32	22
18	24	23	28	22
19	24	23	24	22
20	24	23	24	22

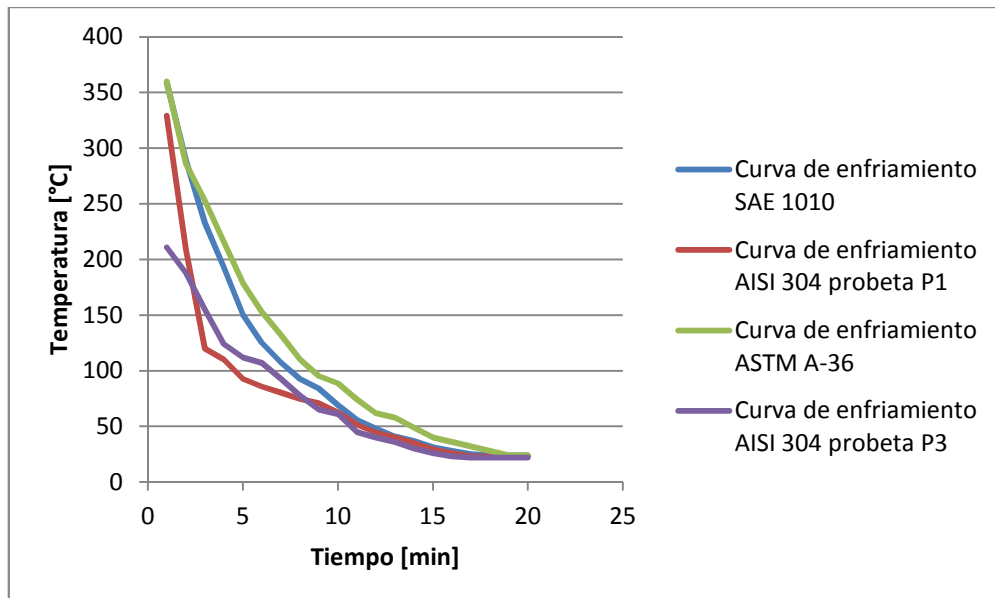


Figura 6.29 Curva de enfriamiento probetas precalentadas

6.3.5.8.2 Análisis Metalográfico

Para el análisis metalográfico se decide realizar, a una muestra de cada probeta que no presenta ningún tipo de discontinuidad superficial. Este análisis se lo realiza con el objeto de observar el estado interno del cordón de soldadura, la ZAC, encontrar posibles fisuras internas y comprobar la disminución de martensita (fig. 6.30).



Figura 6.30 Probetas para ensayo metalográfico

El análisis metalográfico se lo realiza en dos partes: un análisis preliminar mediante macrografías a 10X, en las cuales las muestras fueron desbastadas, pulidas (con material abrasivo fino), y atacadas con Nital al 2%(aceros al carbono) y Marble (aceros inoxidable).

El segundo análisis se realiza mediante micrografías con aumentos a 100X y 500X, en las cuales las muestras fueron pulidas en paño con alúmina, con el objeto de tener una superficie sin imperfecciones, y posteriormente atacadas con Nital al 2%(aceros al carbono) y Marble (aceros inoxidable).

Debido a la dificultad para pulir el acero inoxidable austenítico, se procedió a realizar el ataque electrolítico a una muestra de este material para poder observar la estructura interna de este material.

6.3.5.8.3 Análisis Macrográfico

Las macrografías se realizan en las dos probetas antes mencionadas en el punto 6.3.5.8.2, con el objeto de comprobar la distribución de defectos como grietas superficiales, rechupes, partes soldadas.

Las macrografías de las diferentes muestras se pueden observar en las tablas 6.44 y 6.45.

Tabla 6.44 Análisis macrográfico con aumento 10X de la muestra P1

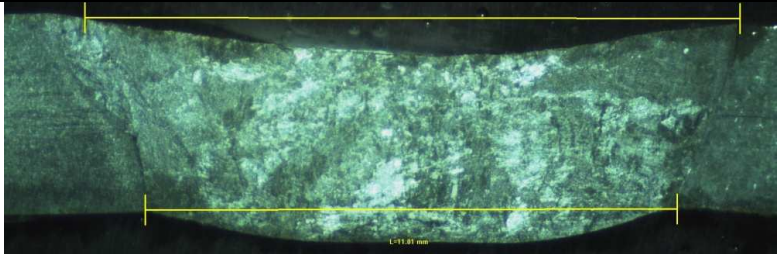
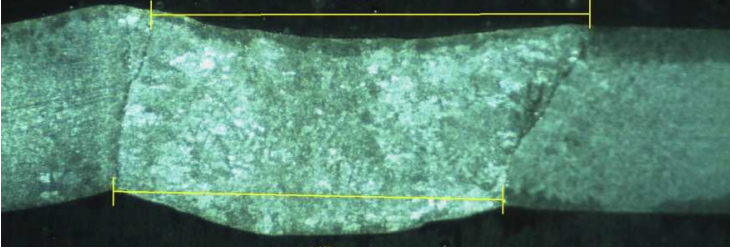
Material (a)	Material (b)	Proceso	Temperatura de precalentamiento	Observaciones	Tipo de Discontinuidad	Tamaño de la discontinuidad
						
SAE 1010	AISI 304	GTAW	Ambiente	Se observa un cordón de soldadura con fusión completa entre el metal base y el cordón de soldadura, con penetración en la raíz y sin presencia de discontinuidades.	Ninguna	-----

Tabla 6.45 Análisis macrográfico con aumento 10X de la muestra P2

Material (a)	Material (b)	Proceso	Temperatura de precalentamiento	Observaciones	Tipo de Discontinuidad	Tamaño de la discontinuidad
						

6.3.5.8.4 Análisis micrográfico

Las micrografías se realizan luego de que las probetas hayan pasado por el análisis macrográfico, por lo tanto se procede a realizar este análisis en las dos probetas analizadas en el 6.3.5.8.3, con el objeto de observar características estructurales, deducir posibles variaciones que experimentan las propiedades mecánicas de los metales base luego del proceso de soldadura.

Las micrografías de las diferentes muestras se pueden observar en las tablas 6.46 y 6.47.

Tabla 6.46 Micrografías de la muestra P1

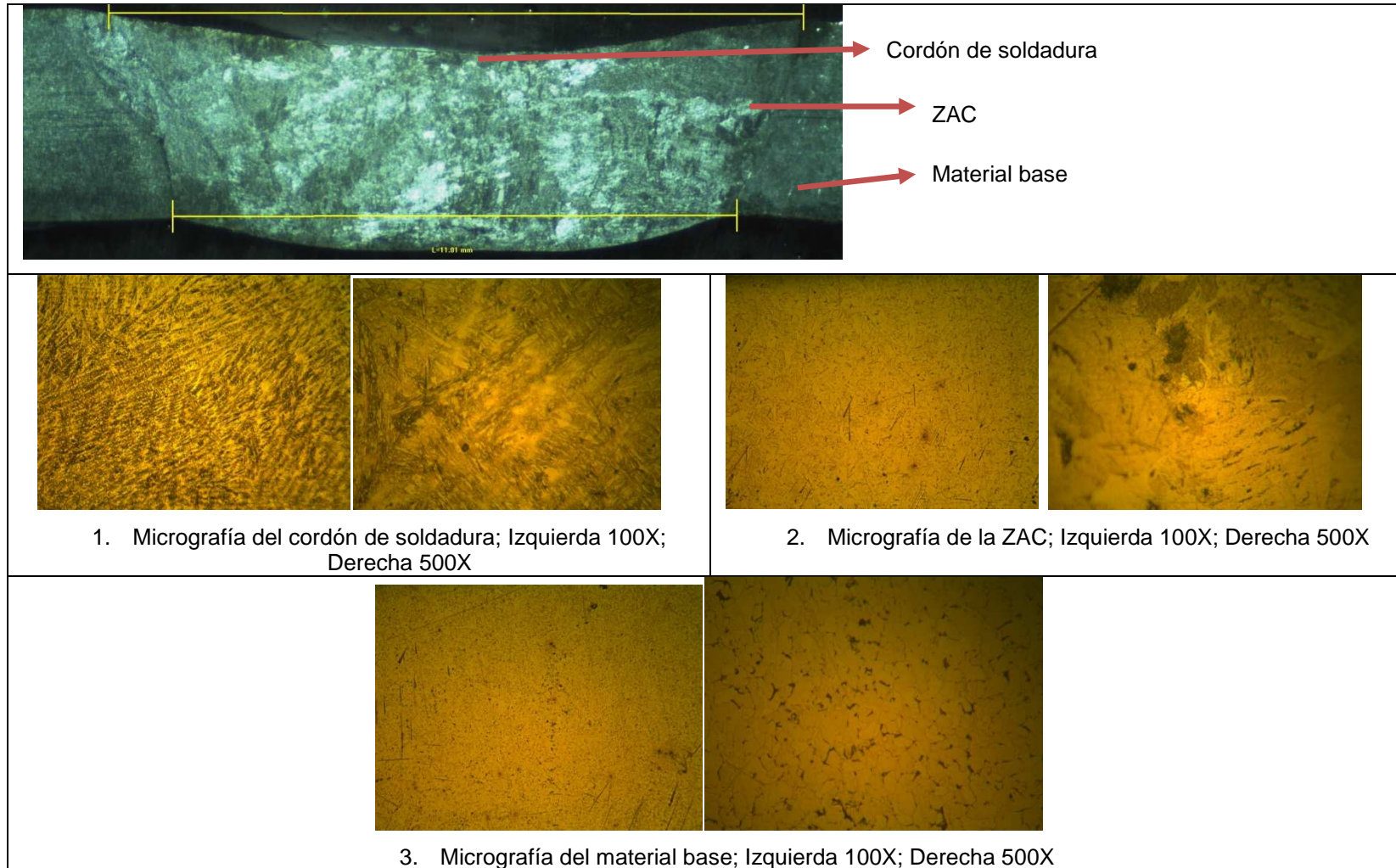
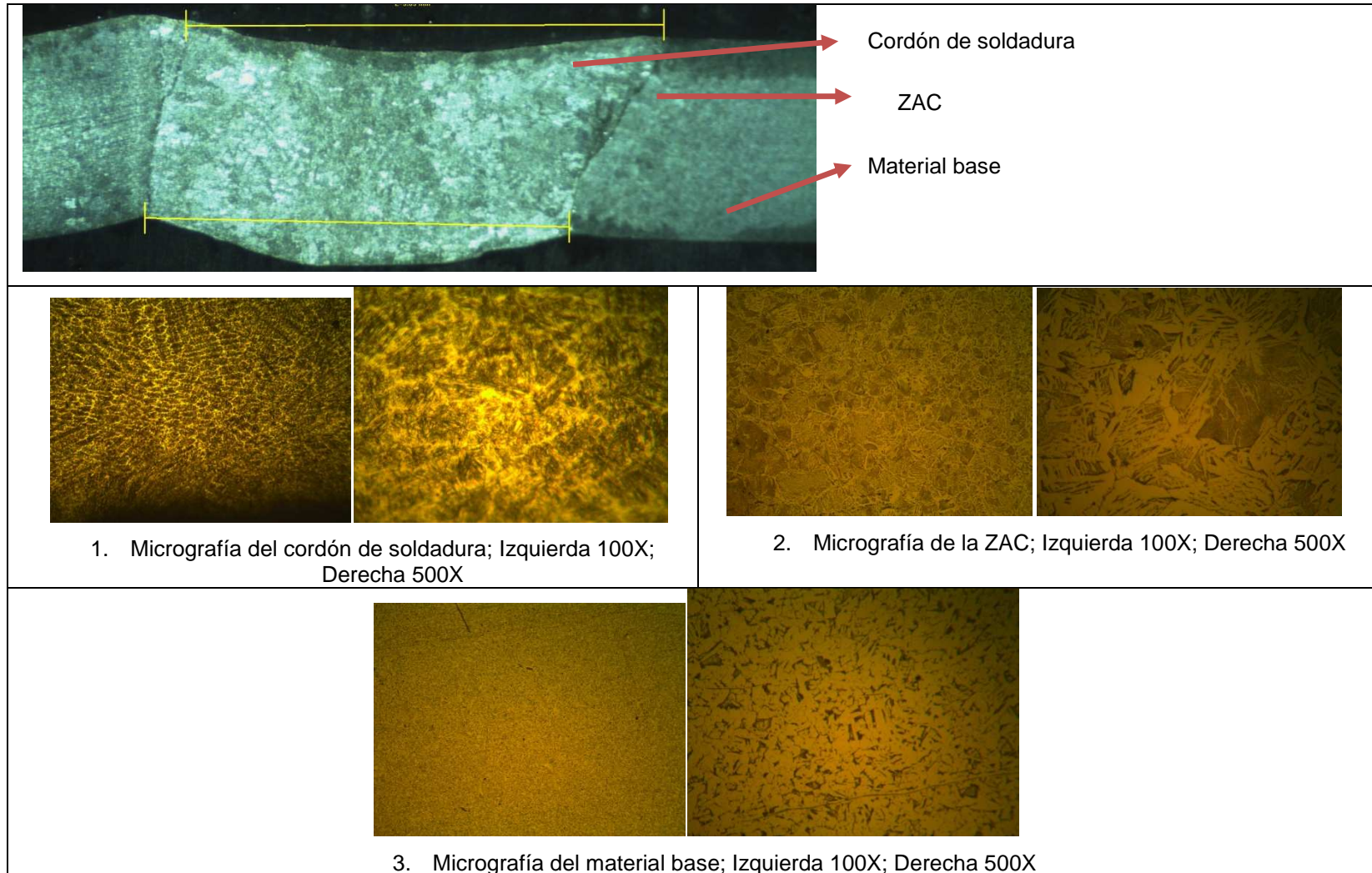


Tabla 6.47 Micrografías de la muestra P2



CAPÍTULO 7

ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se analiza los resultados obtenidos tanto en el ensayo de soldabilidad de Varestraint, y Houldcroft, como los ensayos suplementarios que se realizaron en las probetas, con el fin de comprobar si las uniones soldadas presentan defectos, y si estos son o no admitidos por las normas que rigen dichos ensayos.

Se realiza un análisis comparativo de la soldabilidad que se obtiene entre un acero inoxidable AISI 304 con un acero al carbono SAE 1010, y la soldadura entre un acero inoxidable AISI 304 con un acero estructural A-36, con el objetivo de evaluar el comportamiento de estos aceros y las distintas combinaciones bajo el proceso de soldadura GTAW, y bajo los mismos parámetros de soldadura, tales como tensión, corriente de soldadura, posición, gas de protección, etc.

Por facilidad las probetas compuestas por un acero inoxidable AISI 304 y un acero al carbono SAE 1010, serán denominadas 1X para análisis comparativo con las probetas compuestas por un acero inoxidable AISI 304 y un acero estructural ASTM A-36 denominadas 3X.

7.2 ANÁLISIS DEL ENSAYO

7.2.1 ANÁLISIS DE LA SOLDADURA DE ENSAYO

Luego de registrar las variables y parámetros de las soldaduras de ensayo según lo establecido por normas, en las tablas 6.11 y 6.45, se puede realizar un análisis comparativo del comportamiento de las dos combinaciones entre aceros, bajo el mismo procedimiento de soldadura.

- Los ensayos de soldabilidad se realizaron en un mismo día, tanto para las probetas con denominación 1X(acero AISI 304 con SAE 1010), como para las probetas 3X(acero AISI 304 con A-36), de tal manera que se tienen

iguales condiciones iniciales de temperatura ambiente 20 °C y humedad relativa en la ciudad de Quito del 70% para los dos tipos de combinaciones de material base, por lo que los factores ambientales no influyen a las soldaduras obtenidas como motivo de comparación en los ensayos de soldabilidad.

- Los ensayos se realizaron bajo las mismas variables eléctricas (tensión, corriente), por lo que la diferencia del calor aportado que se aprecia en las tablas 6.11, y 6.45, se debe a la velocidad de avance de cada probeta, obteniéndose claramente mayor calor aportado para las probetas 3X, con lo cual se tiene que aportar menos calor para producir un charco de soldadura para soldar un AISI 304 con un SAE 1010, que para soldar un AISI 304 con un A-36, y además el tiempo que se puede tardar en soldar un AISI 304 con un SAE 1010 es menor que al soldar un AISI 304 con un A-36.
- Para el ensayo de soldabilidad Varestraint, al variar las condiciones de carga y el radio de curvatura del dado, el avance del charco de soldadura también cambia, y en la tabla 6.11, se observa que para las probetas con mayor carga y menor radio de curvatura en el dado se tiene una velocidad de avance más rápida que para las probetas de menor carga y mayor radio de curvatura en el dado, para tratar de producir una menor tensión en las probetas y así evitar la menor deformación en las mismas, y posibles fisuras en el cordón de soldadura.

En la tabla 7.1 se puede observar los heat input de las probetas ensayadas.

Tabla 7.1 Heat input de las probetas ensayadas

ENSAYO VARESTRAINT		ENSAYO HOULDCROFT	
PROBETA	HEAT INPUT [J/mm]	PROBETA	HEAT INPUT [J/mm]
1A	782,28	1 A	752,85
1C	717,09	1B	821,29
1D	717,09	1C	752,85
1E	730,13	1D	855,51
3 A	1079,55	3 A	787,07
3C	899,62	3B	769,96
3D	821,39	3C	855,51
3E	829,22	3D	804,18

7.2.2 ANÁLISIS DE LA INSPECCIÓN DE FISURAS SUPERFICIALES

Para los dos ensayos directos de soldabilidad, Varestraint y Houldcroft, se analiza el cordón superficialmente mediante inspección visual, y reforzando esta inspección con tintas penetrantes, según lo establecido por la norma AWS B4.0 para el ensayo Varestraint, y para Houldcroft sin que ninguna norma lo estipule se analizó de esta manera como mejor opción.

- Las probetas de soldadura tanto para el ensayo Varestraint, como para Houldcroft presentan concavidad a lo largo del cordón de soldadura, esto se debe principalmente a que la soldadura se realiza sin material de aporte, no siendo esto tomado como un defecto inaceptable según la norma AWS D1.6, norma a la cual se hace referencia para tener los criterios de aceptación de las discontinuidades que se pueden obtener al soldar este tipo de materiales base.
- Ninguna probeta presenta fisuras, tanto para las probetas con denominación 1X como para las 3X, en ninguno de los ensayos, por lo que se puede decir que la tendencia al fisuramiento tanto del acero SAE 1010, como del A-36 es igual, ya que soportaron las mismas cargas durante el ensayo Varestraint, como las mismas restricciones (concentración de esfuerzos) para el ensayo Houldcroft. A pesar de provocar concentradores de esfuerzos, y aumentar los esfuerzos residuales en los cordones de soldadura, no se tiene ninguna fisura superficial, síntoma de que este proceso de soldadura para unir este tipo de materiales base, es el adecuado.
- Por inspección visual se observa que los cordones de soldadura tanto para las probetas del ensayo Varestraint como para Houldcroft, presentan falta de penetración en ciertas zonas a lo largo del cordón, esto se debe de igual manera a realizar la soldadura sin material de aporte, y a la tendencia del soldador de correr el electrodo de tungsteno hacia el lado de los aceros al carbono, ya que el charco de soldadura tiende a correr hacia el acero inoxidable, y esta falta de penetración se nota claramente que se produce al lado del acero al carbono, acero que es el más difícil de penetrar, aclarando que al ser más difícil de penetrar no quiere decir que tenga una

mala soldabilidad. Poca penetración que se evidencia más en las probetas del ensayo de Varestraint, y esto se debe a que se tiene una probeta en forma de viga en voladizo, la cual se va inclinando hasta tomar la forma del dado curvo, lo que hace que el soldador al intentar obtener más penetración, simplemente ejercerá mayor fuerza sobre esta viga, y la misma se deformará más rápido hacia el dado curvo debido al empuje que está ejerciendo el soldador, lo que no sucede con ensayo Houldcroft que si tiene una base recta, y la probeta no tiende a correrse o deformarse impidiendo la penetración en la soldadura.

En la tabla 7.2 se puede observar los resultados obtenidos de la inspección superficial de los dos ensayos de soldabilidad.

Tabla 7.2 Resultados de la inspección superficial de las probetas ensayadas

PROBETA	PRESENCIA DE FISURAS				CANTIDAD DE FISURAS	LONGITUD DE FISURAS
	INSPECCIÓN VISUAL		INSPECCIÓN POR TINTAS			
ENSAYO VARESTRAINT						
1 A	SI	NO	SI	NO		
1C	SI	NO	SI	NO		
1D	SI	NO	SI	NO		
1E	SI	NO	SI	NO		
3 A	SI	NO	SI	NO		
3C	SI	NO	SI	NO		
3D	SI	NO	SI	NO		
3E	SI	NO	SI	NO		
ENSAYO HOULDCROFT						
1 A	SI	NO	SI	NO		
1B	SI	NO	SI	NO		
1C	SI	NO	SI	NO		
1D	SI	NO	SI	NO		
3 A	SI	NO	SI	NO		
3B	SI	NO	SI	NO		
3C	SI	NO	SI	NO		
3D	SI	NO	SI	NO		

7.2.3 ANÁLISIS DE LA INSPECCIÓN RADIOGRÁFICA

Esta inspección se realizó para analizar si existen o no defectos internos en la soldadura, defectos que no son detectados por inspección visual. Las radiografías

en las probetas ensayadas se realizan sin que la norma para cada ensayo de soldabilidad así lo establezca.

- En las radiografías se verifica la falta de penetración en algunas zonas de los cordones de soldadura de algunas probetas que ya se había observado mediante la inspección visual.
- Aparte de la falta de penetración las radiografías muestran una buena calidad en la soldadura, sin presencia de discontinuidades importantes.

En la tabla 7.3 se puede observar los resultados obtenidos de la inspección radiográfica de los dos ensayos de soldabilidad.

Tabla 7.3 Tabla de las discontinuidades encontradas en las radiografías

PROBETA	DISCONTINUIDADES EN LAS RADIOGRAFIAS				
	FISURAS	OTRAS DISCONTINUIDADES		DESCRIPCIÓN	
ENSAYO VARESTRAINT					
1 A	SI	NO	SI	NO	
1C	SI	NO	SI	NO	FALTA DE PENETRACION
1D	SI	NO	SI	NO	FALTA DE PENETRACION
1E	SI	NO	SI	NO	FALTA DE PENETRACION
3 A	SI	NO	SI	NO	
3C	SI	NO	SI	NO	FALTA DE PENETRACION
3D	SI	NO	SI	NO	FALTA DE PENETRACION
3E	SI	NO	SI	NO	FALTA DE PENETRACION
ENSAYO HOULDCROFT					
1 A	SI	NO	SI	NO	
1B	SI	NO	SI	NO	FALTA DE PENETRACION
1C	SI	NO	SI	NO	
1D	SI	NO	SI	NO	
3 A	SI	NO	SI	NO	
3B	SI	NO	SI	NO	
3C	SI	NO	SI	NO	FALTA DE PENETRACION
3D	SI	NO	SI	NO	

7.2.4 ANÁLISIS DE LA CURVAS DE ENFRIAMIENTO DE LAS PROBETAS ENSAYADAS

El análisis de las curvas de enfriamiento se realizó con el objetivo de comparar las velocidades de enfriamiento de las probetas obtenidas del ensayo VARESTRAINT y HOULDCROFT con las probetas que fueron precalentadas. Con el estudio del enfriamiento de las probetas se puede analizar porque se produjeron posibles

discontinuidades debido al enfriamiento rápido, lo cual genera mayores esfuerzos residuales.

En la figura 7.1 y 7.2 se puede observar las curvas de enfriamiento de las probetas ensayadas.

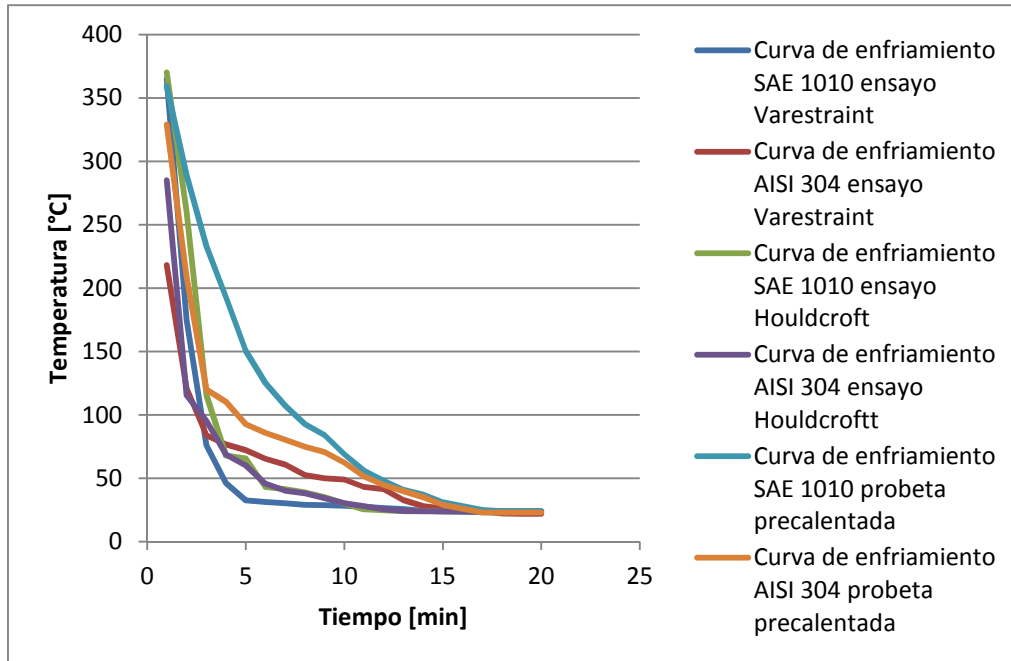


Figura 7.1 Curvas de enfriamiento de las probetas ensayadas con acero SAE 1010

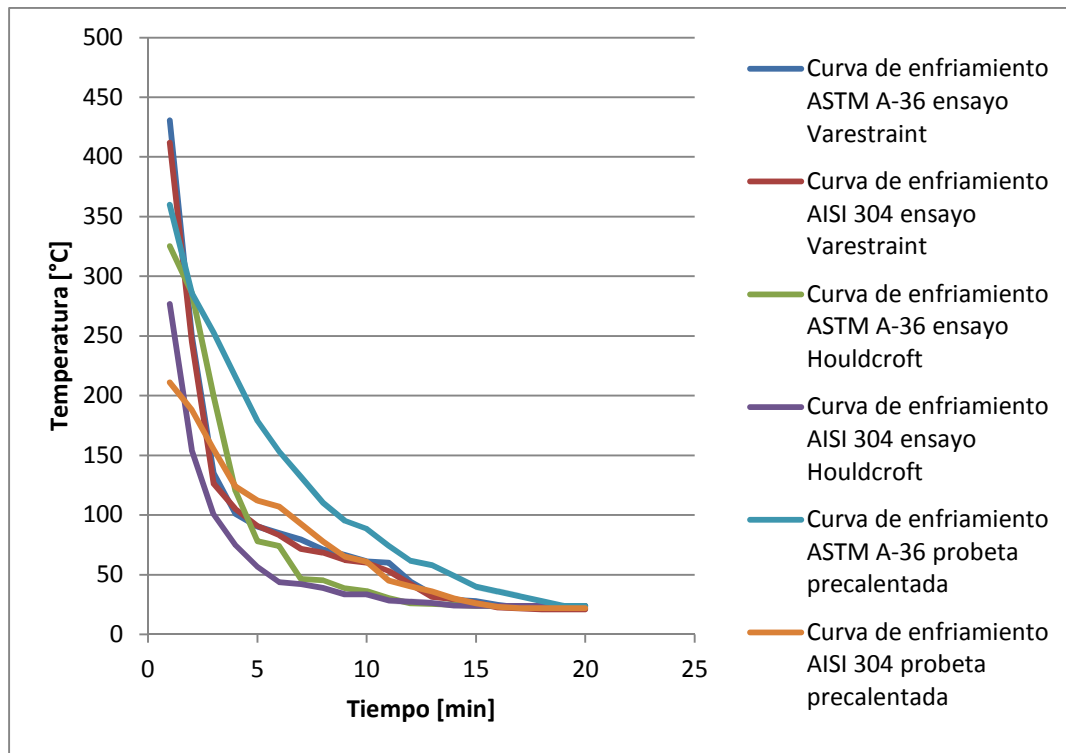


Figura 7.2 Curvas de enfriamiento de las probetas ensayadas con acero ATM A-36

De los gráficos anteriores se puede observar que los aceros al carbono SAE1010 y ASTM A-36 tienden a absorber más calor que el acero inoxidable AISI 304, así como también los aceros al carbono disipan más lento el calor que el acero inoxidable.

También se puede observar que el enfriamiento de las probetas precalentadas es más lenta y controlada que la de las probetas ensayadas a temperatura ambiente, por lo que se puede afirmar que el precalentamiento reduce los defectos que produce el enfriamiento brusco.

Las probetas del ensayo Houldcroft se enfrían a mayor velocidad que las probetas de los otros ensayos, teniendo su estabilización a los 15 minutos de finalizado el ensayo.

7.2.5 ANÁLISIS MACROGRÁFICO DE LAS PROBETAS ENSAYADAS

7.2.5.1 Probetas del ensayo Varestraint

Las macrografías obtenidas del ensayo Varestraint (tablas 6.16, 6.17, 6.18 y 6.19) en su mayoría presentan una buena fusión entre el metal base y el material de aporte, lo que implica que los parámetros como la corriente de soldadura, la velocidad de avance y el ángulo de la torcha son los adecuados, que la remoción de la capa de óxido sobre las superficies preparadas es satisfactoria, que la limpieza de la junta es la apropiada y, que la preparación de la soldadura es correcta para el espesor de material utilizado.

La zona de fusión parcial no es fácilmente visible debido a que la zona de soldadura no presenta metal de aporte y el cordón únicamente fue realizado con el calor de la punta del electrodo por lo que la zona de soldadura se solapa con la ZAC. La profundidad del cordón fue de 0,5mm a 0,7mm la necesaria para no producir fisuras y una longitud de raíz de 0,3mm a 0,6mm.

Entre las probetas ensayadas no hubo la presencia de discontinuidades importantes, algunas probetas presentaron falta de penetración en una sección del cordón, ocasionado probablemente por una aportación deficiente de calor en el arco, o una velocidad excesiva al momento de soldar.

7.2.5.2 Probetas del ensayo Houldcroft

Las probetas del ensayo Houldcroft presentan buena fusión entre el metal base y el material de aporte, lo que implica que los parámetros como la corriente de soldadura y la velocidad de avance son los adecuados, que la remoción de la capa de óxido sobre las superficies preparadas es satisfactoria y que la preparación de la soldadura es correcta para el espesor de 3mm.

La ZAC presenta pequeñas formaciones oscuras debido a una segregación del metal, aumentando en el contenido de carbono, haciendo visible la zona perlítica, producido por el enfriamiento al momento de la solidificación.

La zona de fusión parcial no es fácilmente visible debido a que la zona de soldadura no presenta metal de aporte y el cordón únicamente fue realizado con

el calor de la punta del electrodo por lo que la zona de soldadura se solapa con la ZAC. La profundidad del cordón fue de 0,5mm a 0,7mm la necesaria para no producir fisuras y una longitud de raíz de 0,3mm a 0,6mm.

En la muestra 1B y 3C existe falta de penetración seguramente por una velocidad alta de soldadura o deficiente aportación de calor por parte del arco eléctrico.

Ninguna de las probetas presenta la formación de fisuras, por lo que se podría afirmar preliminarmente que el proceso de soldadura fue de buena calidad.

7.2.5.3 Probetas precalentadas

Las probetas precalentadas presentan buena fusión entre el metal base y el material de aporte, lo que implica que los parámetros como la corriente de soldadura y la velocidad de avance son los adecuados, que la remoción de la capa de óxido sobre las superficies preparadas es satisfactoria y que la preparación de la soldadura es correcta para el espesor de 3mm.

Ninguna de las probetas presenta la formación de discontinuidades, por lo que se podría afirmar preliminarmente que el proceso de soldadura fue de buena calidad.

7.2.5.4 Comparación de las probetas

Las probetas del ensayo Varestraint presentan mayores distancias con falta de penetración que las del ensayo Houldcroft, mientras que las probetas precalentadas no presentaron este defecto debido a que el precalentamiento ayuda a la fusión de los materiales bases.

Se puede afirmar que el proceso de soldadura fue bueno para los tres casos ya que los cordones no presentaron defectos ni externo ni internos.

7.2.6 ANÁLISIS MICROGRÁFICO DE LAS PROBETAS ENSAYADAS

7.2.6.1 Probetas del ensayo Varestraint

7.2.6.1.1 Probetas ensayadas con acero SAE1010

7.2.6.1.1.1 Metal base

En las micrografías obtenidas del metal base, observadas en las figuras A10.1, A10.2, A10.7 y A10.8, muestran una matriz ferrítica-perlítica con un contenido de carbono de 0,1%, sin crecimiento de grano por el calor; además se observan pequeñas inclusiones tipo silicato.

7.2.6.1.1.2 Zona afectada por el calor ZAC

El análisis microestructural de las figuras A10.3, A10.4, A10.9 y A10.10 indica que el material presenta una microestructura de ferrita acicular debido a la velocidad de enfriamiento característica de un acero de bajo contenido de carbono, presentando además una gran cantidad de inclusiones tipo silicato. El tamaño de grano de la ZAC es mayor a los granos del metal base.

7.2.6.1.1.3 Cordón de soldadura

Las figuras A10.5, A10.6, A10.11 y A10.12 muestran una matriz ferrítico-perlítico con la formación de ferrita acicular, con granos columnares orientados a la fuente de calor. Un tamaño de grano superior a las otras micrografías. Existe mayor presencia de inclusiones tipo silicato.

7.2.6.1.2 Probetas ensayadas con acero ASTM A-36

7.2.6.1.2.1 Metal base

En las micrografías obtenidas del metal base, observadas en las figuras A10.13, A10.14, A10.19 y A10.20, muestran una matriz ferrítica-perlítica con un contenido de carbono de 0,2%, sin crecimiento de grano por el calor aportado; además se observan pequeñas inclusiones tipo silicato.

7.2.6.1.2.2 Zona afectada por el calor ZAC

El análisis microestructural de las figuras A10.15, A10.16, A10.21 y A10.22 indica una matriz ferrítica-perlítica con formaciones de ferrita acicular y un crecimiento gradual del tamaño del grano a medida que se acerca a la zona de fusión parcial, además la presencia de inclusiones tipo silicato.

7.2.6.1.2.3 Cordón de soldadura

Las figuras A10.17, A10.18, A10.23 y A10.24 muestran una matriz ferrítico-perlítico con la formación de ferrita acicular. Un tamaño de grano superior a las micrografías anteriores. Existe presencia de inclusiones tipo silicato en el borde de grano, así como la formación de martensita.

7.2.6.2 Probetas del ensayo Houldcroft

7.2.6.2.1 Probetas ensayadas con acero SAE 1010

7.2.6.2.1.1 Metal base

Las micrografías obtenidas del metal base del ensayo Houldcroft observadas en las figuras del anexo 12.1 y 12.2, muestran una matriz ferrítica-perlítica con un contenido de carbono de 0,1% con granos alargados de perlita en dirección del laminado en caliente y terminado en frío del que fue expuesto el material base.

7.2.6.2.1.2 Zona afectada por el calor ZAC

El análisis microestructural de la ZAC indica una matriz ferrítica-perlítica con formaciones de ferrita acicular y orientación del grano en dirección a la extracción del calor. También se observa el crecimiento de grano en comparación a la micrografía anterior.

7.2.6.2.1.3 Cordón de soldadura

Las micrografías muestran una matriz ferrítico-perlítico con la formación de ferrita acicular. Un tamaño de grano mayor al de la ZAC. Presenta un crecimiento de grano en dirección a la extracción de calor. Pequeñas inclusiones de tipo silicato. La micrografía de la figura A12.12 se puede observar la presencia de martensita debido a la falta de precalentamiento del material base.

7.2.6.2.2 Probetas ensayadas con acero ASTM A-36

7.2.6.2.2.1 Metal base

Las micrografías obtenidas del metal base del ensayo observadas en las figuras del anexo 12.3 y 12.4, muestran una matriz ferrítica-perlítica con un contenido de carbono de 0,25% con granos alargados de perlita en dirección del laminado en caliente y terminado en frío del que fue expuesto el material base.

7.2.6.2.2.2 Zona afectada por el calor ZAC

El análisis microestructural de la ZAC indica una matriz ferrítica-perlítica con formaciones de ferrita acicular y orientación del grano en dirección a la extracción del calor. Se puede observar el incremento del tamaño de grano a comparación del material base.

7.2.6.2.2.3 Cordón de soldadura

Las micrografías muestran una matriz ferrítico-perlítico con la formación de ferrita acicular. Un tamaño de grano mayor al de la ZAC. Presenta un crecimiento de grano en dirección a la extracción de calor. Pequeñas inclusiones de tipo silicato. La micrografía de la figura A12.24 se puede observar la presencia de martensita debido a la falta de precalentamiento en los materiales bases.

7.2.6.3 Probetas del ensayo Precaentadas

7.2.6.3.1 Probetas ensayadas con acero SAE 1010

7.2.6.3.1.1 Metal base

Las micrografías obtenidas del metal base de este análisis observadas en las figuras del anexo 14.1, muestran una matriz ferrítica-perlítica con un contenido de carbono de 0,1% con granos alargados de perlita en dirección del laminado en frío del que fue expuesto el material base.

7.2.6.3.1.2 Zona afectada por el calor ZAC

El análisis microestructural de la ZAC indica una matriz ferrítica-perlítica con formaciones de ferrita acicular, orientación y crecimiento del grano en dirección a la extracción del calor. Se puede observar que el tamaño del grano en esta parte aunque es mayor al material base es menor al crecimiento de grano observado en los ensayos de Vareststraint y Houldcroft.

7.2.6.3.1.3 Cordón de soldadura

Las micrografías muestran una matriz ferrítico-perlítico con la formación de ferrita acicular. Un tamaño de grano mayor al de la ZAC. Presenta un crecimiento de grano en dirección a la extracción de calor. Pequeñas inclusiones de tipo silicato.

Se observa que ya no hay presencia de martensita por lo que se puede afirmar que el precalentamiento elimina la formación de la misma.

7.2.6.3.2 Probetas ensayadas con acero ASTM A-36

7.2.6.3.2.1 Metal base

Las micrografías obtenidas del metal base de este análisis observadas en las figuras del anexo 14.2, muestran una matriz ferrítica-perlítica con un contenido de carbono de 0,2% con granos alargados de perlita en dirección del laminado en frío del que fue expuesto el material base.

7.2.6.3.2.2 Zona afectada por el calor ZAC

El análisis microestructural de la ZAC indica una matriz ferrítica-perlítica con formaciones de ferrita acicular, orientación y crecimiento del grano en dirección a la extracción del calor. Se puede observar que el tamaño del grano en esta parte aunque es mayor al material base es menor al crecimiento de grano observado en los ensayos de Varestreint y Houldcroft.

7.2.6.3.2.3 Metal de soldadura

Las micrografías muestran una matriz ferrítico-perlítico con la formación de ferrita acicular. Un tamaño de grano menor al de la ZAC. Presenta un crecimiento de grano en dirección a la extracción de calor. Pequeñas inclusiones de tipo silicato.

7.2.7 ENSAYOS SUPLEMENTARIOS

7.2.7.1 ENSAYO DE TRACCION

- Como se observa en la Tabla 6.38 Resistencia a la tracción de las probetas ensayadas. Las 4 probetas ensayadas fallan en el material base, esta falla se produce tanto en el acero ASTM A-36, como en el acero SAE 1010,

debido a que entre el acero inoxidable y el acero al carbono, el acero inoxidable presenta mayor resistencia a la tracción.

- En la Tabla 7.4, se observa que las probetas con mayor resistencia a la tracción son las T2-A36 y T7-A36, esto se debe a que la resistencia a la tracción del acero ASTM A-36 es mayor que la resistencia a las tracción que tiene un acero SAE 1010.

Tabla 7.4 Valores de Resistencia a la tracción

Identificación	Resistencia a la tracción	
	ksi	MPa
T2 - A36	88,7	612
T7 - A36	67,4	465
T2 - SAE 1010	46,4	320
T7 - SAE1010	58,5	403

Se puede decir que el cordón de soldadura presenta una buena resistencia a la tracción, tanto para las probetas T#-A36, como para las probetas T#-SAE1010 por que la falla se produjo en el material base como se mencionó anteriormente, al momento de aplicar este tipo de soldaduras con este tipo de materiales la resistencia mecánica va a depender de lo que soporte el acero al carbono, y no de la resistencia del cordón de soldadura que es mayor a la del acero al carbono. El cordón de soldadura tiene igual o mejores propiedades mecánicas que el material base y esto es lo que se desea obtener cuando se realiza la unión de materiales mediante este proceso.

7.2.7.2 ENSAYO DE DOBLADO

En la Tabla 6.39 Resultados del ensayo de doblado, se observa que ninguna de las probetas a las que se realizó este ensayo destructivo presenta fisuras, u otro tipo de discontinuidades, tanto para los doblados de raíz como para los doblados de cara, afirmando en conjunto con los resultados del ensayo de tracción que el cordón de soldadura que se obtiene mediante el proceso GTAW sin material de aporte para unir un acero inoxidable con aceros al carbono es de buena calidad. El comportamiento del acero inoxidable respecto al acero al carbono en este ensayo también presenta grandes diferencias, es muy difícil lograr un doblado

equilibrado, ya que el acero inoxidable presenta más resistencia al doblado que el acero al carbono, lo cual hace pensar que el cordón de soldadura en el lado del acero inoxidable presenta mejores propiedades mecánicas que el lado del acero al carbono, limitando de esta manera cualquier aplicación a la resistencia que presenta el acero al carbono tal y como ya se mencionó en el análisis del ensayo de tracción.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 CONCLUSIONES

El proceso de soldadura GTAW es el adecuado para unir los materiales disimiles planteados en el proyecto, debido a que proporciona soldaduras limpias de escoria , y además son de gran calidad al tener siempre protegido el área de soldadura de la atmosfera, esto se corrobora al no encontrar ningún tipo de defecto en las probetas ensayadas.

Este tipo de uniones entre aceros disimiles, puede ser muy útil en la industria, pero siempre va a estar limitada por la alta probabilidad a producir una junta galvánica y por tanto, el cordón de soldadura así como los materiales base se van a corroer fácilmente.

En el ensayo Houldcroft se crean concentradores de esfuerzos para simular condiciones extremas, pero ninguna probeta presento fisuras tanto superficiales como internas, lo que nos da la idea de que los parámetros de soldadura son los ideales para unir este tipo de aceros, y que no existe ninguna diferencia en el comportamiento durante este ensayo para las probetas de acero SAE 1010 con las probetas de acero ASTM A-36. Esto ocurre de igual manera que para las probetas analizadas en el ensayo Varestraint, que a pesar de simular una condición extrema para formar fisuras, ninguna de las probetas de este ensayo presentaron ni fisuras superficiales ni internas.

La soldadura entre aceros inoxidable y aceros al carbono presentan gran resistencia mecánica, llegando a tener en el cordón de soldadura mayor resistencia a la tracción que uno de los materiales base utilizados, con esto se concluye que en aplicaciones industriales la soldadura no va a fallar

mecánicamente al menos si está sometida a esfuerzos menores a los que soportan los aceros al carbono ensayados.

Para evitar la formación de estructuras frágiles como la martensita, es necesario precalentar los aceros previo a la soldadura, a pesar de que el cálculo de la temperatura de precalentamiento nos arrojó un valor alto, no se utiliza esa temperatura, debido a que el acero inoxidable no puede calentarse a temperaturas muy altas para evitar la precipitación de carburos y puede quedar sensible a la corrosión intergranular.

El acero inoxidable austenítico AISI 304 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.

Para cualquier análisis de soldadura es importante realizar una inspección metalográfica para examinar las transformaciones presentes en las microestructuras, y así determinar los factores que pueden provocar la presencia de fisuras.

La velocidad de enfriamiento de la junta influye drásticamente en la formación de microestructuras frágiles y duras en la soldadura.

En soldaduras sin material de aporte es relevante controlar parámetros como son la velocidad de avance y el calor aportado por el arco, para así obtener un buen cordón de soldadura.

“Por tanto se pueden soldar el acero inoxidable AISI 304 con los aceros SAE 1010 y ASTM A-36, en espesores de hasta 3mm sin utilizar material de aporte, bajo los parámetros de soldadura para el proceso GTAW utilizados en este proyecto, y con una temperatura de precalentamiento de 300 °C”.

8.2 RECOMENDACIONES

Para analizar la soldabilidad de los aceros que el proyecto contempla, los ensayos de Houldcroft y de Varestraint son adecuados para el proceso GTAW, y nos permiten analizar la soldabilidad de los aceros en los espesores deseados para no utilizar material de aporte, pero se recomienda de preferencia utilizar el ensayo de soldabilidad Varestraint, ya que es un ensayo que está regido bajo la norma AWS B4.0, y se tiene mayor cantidad de información tanto bibliográficamente, como de ensayos ya realizado en la industria, lo que no sucede con el ensayo de Houldcroft, el cual posee basta información, y no está regido bajo ninguna normativa internacional.

A pesar de tener una excelente soldabilidad principalmente por el bajo contenido de carbono, los aceros al carbono utilizados en los ensayos presentan mayor resistencia a la penetración que los aceros inoxidable, esto se debe a que el acero inoxidable tiene mayor capacidad de absorber el calor que los aceros al carbono, por lo que se recomienda realizar un pequeño bisel en los aceros al carbono antes de proceder con la soldadura, y tomar siempre en cuenta que los aceros al carbono deber ser limpiados con el fin de evitar cualquier tipo de contaminación que afecte el proceso de soldadura, lo que no se debe hacer al acero inoxidable, porque se estaría quitando la capa de óxido que le protege de la corrosión y por tanto su principal propiedad por la que es utilizado.

Las características del acero inoxidable le hacen critico en el proceso de soldadura utilizado en el proyecto, por lo que se recomienda regirse en las normas para aceros inoxidables y no tanto para las existentes para aceros al carbono, por lo cual si hay la necesidad de realizar una soldadura entre estos materiales para espesores mayores a 3mm, la recomendación viene a que se usen materiales de aporte para aceros inoxidables tales como el AWS E 308 o AWS ER 308 para soldar aceros AISI 304 con algún material disímil a este.

Cuando se sueldan materiales con espesores muy bajos, tener muy en cuenta que se puede perforar la lámina si se excede en el calor aportado en el proceso de soldadura, esto se puede evitar eligiendo la intensidad de corriente adecuada y controlando que la velocidad de avance de la soldadura no sea demasiado lenta.

Se recomienda utilizar como última opción para unir aceros disimiles, el proceso de soldadura utilizado en este proyecto, pueden existir otras opciones que permitan unir estos materiales sin la necesidad de que se cambie la composición o las propiedades de los materiales, y para la selección de la opción más adecuada para realizar la unión tomar muy en cuenta cómo se puede evitar que se produzca una junta galvánica entre estos aceros disimiles. La inspección metalográfica debe ser realizada cuidadosamente, utilizando los reactivos adecuados para el material a analizar para así poder obtener una información clara de la microestructura de la unión.

De ser necesario someter a las juntas a un enfriamiento controlado para así evitar la formación de microestructuras dañinas para la unión.

Se recomienda antes de iniciar el proceso de soldadura sugerir al soldador no llevar un ritmo acelerado de soldadura para así evitar juntas defectuosas.

BIBLIOGRAFÍA

Libros:

1. ASM HANDBOOK; (1993); *Welding, brazing and soldering*”; American society of materials; Vol. 6.
2. AWS; (2007); “Norma AWS B4.0M”; American welding society.
3. AMERICAN WELDING SOCIETY; (2008); “AWS D1.1, *Structural Welding Code-Steel*”; AWS; Miami.
4. AWS; (1999); “AWS. D1.6:1999 *Structural Welding Code-Stainless Steel*”; American welding society.
5. CEMBRERO, Jesús; (2005); “*Ciencia y tecnología de materiales*”; Editorial Prentice Hall; Madrid-España.
6. DEGARMO, P; (1994); “*Materiales y Procesos de Fabricación*”; Editorial Reverté; España.
7. ERNITZ, Anatolio; (1955): “*Manual De Hierros Y Aceros*”, Alcina ediciones; Argentina.
8. GIACHINO,J.W.;WEEKS,W; (2007); “*Técnica Y Práctica De La Soldadura*”; Reverté; España.
9. GINZBURG, Vladimir.; (2005); “*Metallurgical Design Of Flat Rolled Steels*”, Marcel Dekker; EEUU.
10. ISTRATI, George;(1961); “*Manual de los Aceros Inoxidables*”; Editorial Alsina; Argentina.
11. JEFFUS, Larry; (2005); “*Manual Soldadura GTAW*”; Editorial Nobel; España.
12. JEFFUS, Larry; (2005); “*Soldadura: principios y aplicaciones*”; Editorial Nobel; España.
13. KALPAKJIAN, Serope; (2002); “*Manufactura, ingeniería y tecnología*”; Pearson Educación; México.
14. KUZMIN,B.A.;SAMOLOTSKY,A.I; (1982); “*Metalurgia Y Metalografía De Materiales De Construcción*”; Editorial Mir; Rusia.
15. LAUFGANG, Sergio; (2002); “*Curso De Inspectores De Soldadura*”.

16. LINCOLN; (2008); "Catalogo para la Selección de Maquinas Soldadoras"; Ecuador.
17. LIPPOLD, John; (2005); "*Welding metallurgy and weldability of stainless steel*"; Wiley Interscience; EEUU.
18. MANGONON, Pat; (2001); "Ciencia de Materiales y Selección"; Editorial Pearson; Primera edición; España.
19. MESSLER, Robert; (1999); "*Principles Of Welding: Processes, Physics, Chemistry, And Metallurgy*"; John Wiley; EEUU.
20. MOLERA, Pere; (1992); "*Soldadura Industrial: clases y aplicaciones*"; Productica; España.
21. PASCUAL, J; (1970); "*Técnica y Práctica del tratamiento térmico de los Metales Ferrosos*"; Blume; España.
22. QUESADA, J.; ZALAZAR, M.; (2004); "*Métodos Para Calcular El Pre calentamiento De Uniones Soldadas*"; La Serena; Chile.
23. Soldaduras Zelecta S.A; (2008); "*Çatálogo soldadoras*".
24. TECNIPRESS INGENIEROS ED; "ACEROS PRODUCTOS Y DERIVADOS" Tomo 1.
25. TUBOCOBRE S. A.; (2008); "*Boletín Técnico*".

Internet:

1. <http://www.bssa.org.uk/topics.php?article=121>
2. <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2005/bmfic744e/doc/bmfic744e.pdf>
3. <http://www2.ing.puc.cl/~icm2312/apuntes/materiales/materials3.html>
4. http://4.bp.blogspot.com/_ypQZyFOEyRA/SjKA7ekm8ul/AAAAAAAAA DbQ/Iu2eR-KNQhw/s1600-h/Diagrama+Fe-C.JPG
5. www.angelfire.com
6. www.scribd.com