



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**“ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE LA TEMPERATURA DE
PRECALENTAMIENTO SOBRE LA MICROESTRUCTURA Y
PROPIEDADES MECÁNICAS DE ACEROS ASTM A36 Y ASTM
572 GR. 50 SOLDADOS MEDIANTE PROCESO SMAW”**

Trabajo de titulación

Tipo: Trabajo Experimental

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO MECÁNICO

AUTORES: ERIKA PAHOLA MEDINA GUAMÁN

RONALD PATRICIO VACA GUADALUPE

DIRECTOR: MARCO HOMERO ALMENDÁRIZ PUENTE

Riobamba-Ecuador

2020

©2020 Erika Pahola Medina Guamán; & Ronald Patricio Vaca Guadalupe

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Nosotros, Erika Pahola Medina Guamán y Ronald Patricio Vaca Guadalupe declaramos que el presente trabajo de titulación es de nuestra autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos del documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autores, asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Titulación. El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 20 de noviembre de 2020






Erika Pahola Medina Guamán
060404075-8



Ronald Patricio Vaca Guadalupe
150114571-6

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

El Tribunal del trabajo de titulación certifica que: El trabajo de titulación: Tipo: Trabajo Experimental, **ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE LA TEMPERATURA DE PRECALENTAMIENTO SOBRE LA MICROESTRUCTURA Y PROPIEDADES MECÁNICAS DE ACEROS ASTM A36 Y ASTM 572 GR. 50 SOLDADOS MEDIANTE PROCESO SMAW**, realizado por los señores: **ERIKA PAHOLA MEDINA GUAMÁN y RONALD PATRICIO VACA GUADALUPE**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
<p>Ing. Edwin Fernando Viteri Núñez PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</p>	<p>EDWIN FERNANDO VITERI NUNEZ</p>  <p>Firmado digitalmente por EDWIN FERNANDO VITERI NUNEZ Fecha: 2020.12.17 13:01:14 -05'00'</p>	<p>2020-11-20</p>
<p>Ing. Marco Almendáriz Puente DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN</p>	 <p>Firmado electrónicamente por: MARCO HOMERO ALMENDARIZ PUENTE</p>	<p>2020-11-20</p>
<p>Ing. Carlos Serrano Aguiar MIEMBRO DE TRIBUNAL</p>	<p>CARLOS OSWALDO SERRANO AGUIAR</p>  <p>Firmado digitalmente por CARLOS OSWALDO SERRANO AGUIAR Fecha: 2020.12.17 17:25:44 -05'00'</p>	<p>2020-11-20</p>

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo a mis padres José y Mariana quienes con su gran amor y apoyo incondicional supieron inculcarme valores como la fortaleza y perseverancia para alcanzar las metas que me propongo. A mi amada hija Alhys que con su compañía me ayudó a no desmayar y a levantarme día a día a luchar por este gran sueño. A mis hermanos Lisbeth y David que con su gran amor y paciencia supieron animarme para continuar adelante. A mi esposo Patricio con quien hemos caminado juntos para cumplir cada uno de nuestros sueños y metas. A mi prima Gabriela a quien considero como una hermana más y que supo guiarme en mis momentos más difíciles. A Erlinda, mi suegra que con su gran esfuerzo y trabajo me han permitido a culminar esta etapa tan importante.

Erika

Mi trabajo de titulación tiene una dedicatoria especial hacia mis padres Erlinda y Carlos, ya que gracias a ellos he logrado superar cada reto que se me ha presentado a lo largo de la carrera, siempre brindándome un apoyo incondicional y el ánimo necesario para poder hoy culminar esta etapa en mi vida. A mi hija Alhys, la persona más importante de mi vida aquella que con el brillo de sus ojos y su sonrisa hacía que cada día despierte con la motivación y fuerza para superar cualquier dificultad. A mis hermanos Fabián, Deysi, Dalia y Jader porque me enseñaron que la familia es lo más importante y que cuando la situación más difícil se pone, ahí están ellos para darnos la mano y ayudarnos a levantar. A mi esposa Erika la persona más valiente que pude conocer con quien hemos logrado de a poco formar una hermosa familia y culminar esta primera etapa en nuestra vida profesional.

Patricio

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por haberme iluminado y guiarme por el camino correcto para alcanzar esta gran meta, obtener mi título universitario. A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo y en particular a los docentes de la Escuela de Ingeniería Mecánica por impartir sus conocimientos y experiencias que serán de suma importancia para mi futuro laboral. A toda mi familia que de una u otra manera han sabido apoyarme para culminar esta gran etapa.

Erika

Agradezco primero a Dios por brindarme una vida llena de salud y regalarme la fortaleza y la perseverancia que necesitaba para hoy poder obtener mi título de Ingeniero. A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por abrirme sus puertas y permitirme formarme como profesional y en especial a mi carrera la Escuela de Ingeniería Mecánica donde pude vivir experiencias únicas e irrepetibles que me ayudaran crecer como persona y a tener la confianza de crear un futuro laboral provechoso.

Patricio

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xviii
ÍNDICE DE ANEXOS	xix
RESUMEN	xx
ABSTRACT.....	xxi
INTRODUCCIÓN	1
Problematización	2
Justificación	2
<i>Justificación teórica</i>	2
<i>Justificación metodológica</i>	3
<i>Justificación práctica</i>	3
Alcance	3
<i>Objetivo General</i>	4
Objetivos Específicos	4
Antecedentes	4
CAPÍTULO I	
1. MARCO TEÓRICO	6
1.1. Marco teórico conceptual	7
1.1.1. Soldadura	7
1.1.1.1. <i>Historia de la Soldadura</i>	7
1.1.1.2. <i>Ventajas de la soldadura</i>	8
1.1.1.3. <i>Desventajas de la soldadura</i>	9
1.1.2. Clasificación de los procesos de soldadura	9
1.1.3. Soldadura SMAW	10

1.1.3.1.	<i>Clasificación de electrodos</i>	10
1.1.3.2.	<i>Electrodos para aceros al carbono</i>	11
1.1.3.3.	<i>Equipo de soldadura SMAW</i>	13
1.1.3.4.	<i>Ventajas de la soldadura SMAW</i>	15
1.1.3.5.	<i>Desventajas de la soldadura SMAW</i>	15
1.1.4.	<i>Clasificación de la soldadura</i>	15
1.1.4.1.	<i>Tipo de soldadura</i>	15
1.1.4.2.	<i>Posición de soldadura</i>	17
1.1.4.3.	<i>Tipos de juntas</i>	17
1.1.5.	<i>Soldabilidad de aceros al Carbono</i>	18
1.1.6.	<i>Defectos de la Soldadura</i>	19
1.1.6.1.	<i>Irregularidades de superficie</i>	19
1.1.6.2.	<i>Discontinuidades de soldadura:</i>	22
1.1.7.	<i>Influencia de la velocidad de enfriamiento</i>	25
1.1.7.1.	<i>Ciclo térmico de la zona afectada térmicamente</i>	25
1.1.8.	<i>Influencia del tamaño de grano en las propiedades de los aceros</i>	26
1.1.9.	<i>Pre calentamiento de juntas soldadas</i>	27
1.1.10.	<i>Acero estructural</i>	28

CAPÍTULO II

2.	MARCO METODOLÓGICO	29
2.1.	Materiales y Equipos	29
2.1.1.	<i>Aceros ASTM A36 y ASTM A572 Gr.50</i>	29
2.1.1.1.	<i>Acero ASTM A36</i>	29
2.1.1.2.	<i>Acero ASTM A572 Gr.50</i>	30
2.1.1.3.	<i>Diseño de juntas soldadas</i>	31
2.1.2.	<i>Equipo utilizado</i>	32
2.1.3.	<i>Electrodo</i>	33

2.1.4.	<i>Equipos para precalentamiento</i>	34
2.1.5.	<i>Instrumento de medición de temperatura</i>	35
2.2.	Temperaturas de precalentamiento	35
2.2.1.	<i>Seferian</i>	35
2.2.2.	<i>Método B.W.R.A</i>	36
2.2.3.	<i>Anexo H - AWS D1.1</i>	40
2.3.	Cálculo de tiempo de permanencia en el horno	49
2.4.	Procedimiento de soldadura	55
2.5.	Parámetros de proceso de soldadura	55
2.6.	Velocidades de enfriamiento en juntas soldadas	58
2.7.	Ciclo térmico de juntas soldadas	59
2.8.	Metodología para la realización de ensayo de tintas penetrantes	61
2.9.	Metodología para ensayos metalográficos y medición de microdurezas	62
2.9.1.	<i>Procedimiento para la obtención de metalografías</i>	63
2.9.2.	<i>Ensayos de microdureza</i>	64
2.10.	Metodología para la realización de ensayos mecánicos	66
2.10.1.	<i>Metodología para ensayo de tracción</i>	66
2.10.1.1.	<i>Ensayo de tracción</i>	69
2.10.2.	<i>Metodología de Ensayo de impacto</i>	70
2.10.2.1.	<i>Ensayo de impacto</i>	73

CAPÍTULO III

3.	MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	74
3.1.	Cálculo de temperatura de precalentamiento	74
3.1.1.	<i>Cálculo de temperatura de precalentamiento – Método Seferian</i>	74
3.1.2.	<i>Cálculo de temperatura de precalentamiento – Método B.W.R.A</i>	76
3.1.3.	<i>Cálculo de temperatura de precalentamiento – AWS D1.1 Anexo H</i>	79
3.2.	Cálculo de las velocidades de enfriamiento	84

3.3.	Determinación del ciclo térmico para juntas soldadas	89
3.4.	Resultado del ensayo de Tintas Penetrantes	105
3.5.	Análisis Metalográfico	107
3.5.1.	<i>Cálculo del tamaño de grano</i>	107
3.5.2.	<i>Microestructura de juntas soldadas acero ASTM A36.....</i>	112
3.5.2.1.	<i>Microestructura de junta soldada sin precalentamiento- acero ASTM A36.....</i>	112
3.5.2.2.	<i>Microestructura de junta soldada, precalentamiento 115°C- acero ASTM A36..</i>	114
3.5.2.3.	<i>Microestructura de junta soldada, precalentamiento 300°C- acero ASTM A36..</i>	116
3.5.2.4.	<i>Microestructura de junta soldada, precalentamiento 500°C- acero ASTM A36..</i>	118
3.5.3.	<i>Microestructura de juntas soldadas acero ASTM A572 Gr.50.</i>	120
3.5.3.1.	<i>Microestructura junta soldada sin precalentamiento- acero ASTM A572 Gr.50.</i>	120
3.5.3.2.	<i>Microestructura junta soldada, precalentamiento de 115°C- ASTM A572</i>	122
3.5.3.3.	<i>Microestructura de junta soldada, precalentamiento de 300°C- ASTM A572</i>	124
3.5.3.4.	<i>Microestructuras de junta soldada, precalentamiento de 500°C- ASTM A572 ...</i>	126
3.5.4.	<i>Interpretación de análisis metalográfico</i>	128
3.5.4.1.	<i>Juntas soldadas de acero ASTM A36.....</i>	128
3.5.4.2.	<i>Juntas soldadas de acero ASTM A572 Gr.50.....</i>	129
3.6.	Ensayos mecánicos en juntas soldadas	131
3.6.1.	<i>Ensayo de Microdureza</i>	131
3.6.1.1.	<i>Análisis de resultados de ensayo de Microdureza.....</i>	133
3.6.2.	<i>Ensayo de Tracción</i>	136
3.6.2.1.	<i>Análisis de resultados del ensayo de Tracción.....</i>	141
3.6.3.	<i>Ensayo de Impacto</i>	145
3.6.3.1.	<i>Análisis de resultados del ensayo de Impacto</i>	149
	CONCLUSIONES.....	153
	RECOMENDACIONES.....	156
	GLOSARIO	
	BIBLIOGRAFÍA	
	ANEXOS	

SIMBOLOGÍA

T_i	temperatura de interés
e	espesor de la placa
T_o	temperatura ambiente
K	conductividad térmica
ρ	densidad
C_P	calor específico
H_n	calor neto absorbido en la soldadura
n	eficiencia de arco
V	voltaje
I	corriente
v	velocidad de avance de soldadura
T_p	Temperatura pico del ciclo térmico
r	distancia desde la fuente de calor
\exp	base de los logaritmos naturales
d'	Espesor critico
T_p	Temperatura de precalentamiento
CE	Carbono equivalente
T_f	Temperatura fílmica
T_{∞}	Temperatura del ambiente convectivo
T_{so}	Temperatura inicial en la superficie
L_c	Longitud característica.
A_s	Área superficial mayor de la placa
P	Perímetro de la placa.
β	Coefficiente de expansión volumétrica.

Ra_L	Numero de Rayleigh.
g	Gravedad.
γ	Viscosidad cinemática.
Nu	Número de Nusselt.
Pr	Número de Prandtl.
h_∞	Coefficiente de convección.
T_{sf}	Temperatura final en la superficie.
T_i	Temperatura en el centro de la placa.
t	Tiempo.
\forall	Volumen de la placa.
\overline{N}_L	Número de intercepciones por unidad de longitud
N_i	Número de intercepciones
L	longitud de las líneas
M	aumento de la micrografía
P_1	Fuerza aplicada en microdureza
d_1	Longitud media de la diagonal, microdureza
D	profundidad de la probeta de impacto
N	profundidad de muesca de la probeta de impacto
W	ancho de la probeta de impacto

LISTA DE ABREVIACIONES

SMAW	Soldadura manual por arco eléctrico
ASTM	Sociedad Americana de Ensayos de Materiales
AWS	Sociedad América de Soldadura
ZAC	Zona afectada por el calor
CC	Corriente continua
CA	Corriente alterna
ANSI	Instituto Nacional Estadounidense de Estándares
ISO	Organización Internacional de Normalización
GMAW	Soldadura por arco metálico con gas
GTAW	Soldadura por arco de tungsteno con gas
PIT	Porosidades
SAW	Soldadura por arco sumergido
CCT	Transformación por enfriamiento continuo
B.W.R.A	British Welding Research Association
HV	Dureza Vickers
WPS	Especificación del procedimiento de soldadura
END	Ensayos no Destructivos
PT	Tintas penetrantes

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1:	Electrodos para aceros al carbono.....	12
Tabla 1-2:	Composición química de acero ASTM A36	30
Tabla 2-2:	Composición química acero ASTM A572.....	30
Tabla 3-2:	Especificaciones Técnicas de la soldadora Linconl Electric.....	33
Tabla 4-2:	Comparación de propiedades de electrodo E6011 y aceros.....	34
Tabla 5-2:	Número de severidad térmica.....	36
Tabla 6-2:	Índice de soldabilidad	37
Tabla 7-2:	Temperaturas de precalentamiento recomendadas según B.W.R.A.	37
Tabla 8-2:	Temperatura mínima de precalentamiento	39
Tabla 9-2:	Factores de multiplicación para procesos de soldadura.....	43
Tabla 10-2:	Índice de susceptibilidad.....	47
Tabla 11-2:	Temperatura de Precalentamiento mínimo.....	48
Tabla 12-2:	Propiedades de acero ASTM A36.....	50
Tabla 13-2:	Propiedades de acero ASTM A572 Gr.50.....	51
Tabla 14-2:	Propiedades del aire a 1atm	51
Tabla 15-2:	Tiempos de precalentamiento en el horno para el acero ASTM A36.	54
Tabla 16-2:	Tiempos de precalentamiento en el horno para el acero ASTM A572 Gr.50	54
Tabla 17-2:	Parámetros de soldadura Acero ASTM A572 Gr.50	56
Tabla 18-2:	Parámetros de soldadura Acero ASTM A36.....	57
Tabla 19-2:	Eficiencia del Arco	59
Tabla 20-2:	Obtención de dimensiones probeta de tracción	67
Tabla 21-2:	Dimensiones probeta de tracción	67
Tabla 1-3:	Composición química acero ASTM A36	74
Tabla 2-3:	Cálculo de temperatura de precalentamiento. Método de Seferian. Acero ASTM A36.....	75
Tabla 3-3:	Composición química Acero ASTM A572 Gr. 50	75
Tabla 4-3:	Cálculo de temperatura de precalentamiento. Método de Seferian. Acero ASTM A572 Gr.50	76
Tabla 5-3:	Cálculo de la temperatura de precalentamiento. Método B.W.R.A.....	78
Tabla 6-3:	Cálculo el valor de Pcm	81
Tabla 7-3:	Temperaturas de Precalentamiento	83
Tabla 8-3:	Dureza Brinell en el cordón de soldadura.	84
Tabla 9-3:	Dureza Brinell en el metal base.	84
Tabla 10-3:	Calor de entrada.....	85

Tabla 11-3:	Cálculo de espesor crítico. Acero ASTM A572 Gr. 50	86
Tabla 12- 3:	Cálculo de espesor crítico. Acero ASTM A36	87
Tabla 13-3:	Velocidades de enfriamiento	88
Tabla 14-3:	Espesor crítico junta sin precalentamiento	89
Tabla 15-3:	Espesor crítico junta 115°C.....	90
Tabla 16-3:	Espesor crítico junta 300°C.....	91
Tabla 17-3:	Espesor crítico junta 500°C.....	91
Tabla 18-3:	Ciclo térmico Acero ASTM A36. Sin precalentamiento	92
Tabla 19-3:	Ciclo térmico Acero ASTM A572 Gr.50. Sin precalentamiento	94
Tabla 20-3:	Ciclo térmico Acero ASTM A36. Precalentamiento 115°C.....	95
Tabla 21-3:	Ciclo térmico Acero ASTM A572 Gr.50. Precalentamiento 115°C.....	97
Tabla 22-3:	Ciclo térmico Acero ASTM A36. Precalentamiento 300°C.....	98
Tabla 23-3:	Ciclo térmico Acero ASTM A572 Gr.50. Precalentamiento 300°C.....	100
Tabla 24-3:	Ciclo térmico Acero ASTM A36. Precalentamiento 500°C.....	101
Tabla 25-3:	Ciclo térmico Acero ASTM A572. Gr50. Precalentamiento 500°C.....	103
Tabla 26-3:	Resultados de ensayo de tintas penetrantes acero ASTM A36.....	105
Tabla 27-3:	Resultados de ensayo de tintas penetrantes acero ASTM A572	106
Tabla 28-3:	Tamaño de grano- Acero ASTM A36.....	109
Tabla 29-3.	Tamaño de grano- Acero ASTM A572 Gr.50	110
Tabla 30-3:	Comparación entre tamaño de grano de juntas soldadas ASTM A36.....	129
Tabla 31-3:	Comparación entre tamaño de grano de juntas soldadas ASTM A572 Gr 50...	130
Tabla 32-3:	Dureza Vickers acero ASTM A36	131
Tabla 33-3:	Dureza Vickers acero ASTM A572	132
Tabla 34-3:	Datos del ensayo de tracción.....	136
Tabla 35-3:	Identificación de probetas de tracción acero ASTM A572 Gr.50.....	137
Tabla 36-3:	Resultados de ensayo de tracción Acero ASTM A572 Gr.50.....	138
Tabla 37-3:	Resultados de ensayo de tracción Acero ASTM A36.....	139
Tabla 38-3:	Resistencia a la Tracción. Acero ASTM A572 Gr.50	141
Tabla 39-3:	Resistencia a la Tracción. Acero ASTM A36	143
Tabla 40-3:	Datos de ensayo de Impacto.....	146
Tabla 41-3:	Identificación de probetas para ensayo de impacto	146
Tabla 42-3:	Resultados de ensayo de impacto. Acero ASTM A572 Gr. 50.....	147
Tabla 43-3:	Resultados de ensayo de impacto. Acero ASTM A36.....	148
Tabla 44-3:	Energía absorbida y Resistencia al impacto. Acero ASTM A572 Gr. 50	149
Tabla 45-3:	Energía absorbida y Resistencia al impacto. Acero ASTM A36.....	150

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1:	Procesos de soldadura	9
Figura 2-1:	Tipos de soldadura por arco eléctrico	10
Figura 3-1:	Soldadura SMAW	10
Figura 4-1:	Clasificación de electrodos metálicos	11
Figura 5-1:	Equipo para soldadura SMAW	13
Figura 6-1:	Curva Voltaje- amperaje para una fuente de corriente y voltaje constante.	14
Figura 7-1:	Efecto de la pendiente de la curva voltaje- amperaje	14
Figura 8-1:	Soldadura de filete.....	16
Figura 9-1:	Soldadura de ranura simple.	16
Figura 10-1:	Soldadura de ranura doble.	16
Figura 11-1:	a) Soldadura de muesca. b) Soldadura de tapón.	16
Figura 12-1.	Tipos de soldadura por el tipo de posición.....	17
Figura 13-1.	Tipos de juntas.....	18
Figura 14-1.	Efecto del Carbono en la Soldabilidad.....	18
Figura 15-1.	Ondas de cordón de soldadura desiguales.....	20
Figura 16-1.	A. Buena soldadura de filete. B. Soldadura de filete cóncavo. C. Soldadura de filete convexo.....	20
Figura 17-1.	Socavados.....	21
Figura 18-1.	Sobre espesor en soldadura.....	21
Figura 19-1.	Falta de penetración en la soldadura.....	22
Figura 20-1.	Porosidades.....	22
Figura 21-1.	Inclusiones.....	23
Figura 22-1.	Fusión incompleta.....	23
Figura 23-1.	Falta de penetración.....	24
Figura 24-1.	Fusión excesiva	24
Figura 25-1.	Grietas en frio.....	24
Figura 26-1.	Grietas en caliente.	25
Figura 27-1.	Diagrama de un proceso de soldadura con un sistema de coordenadas que tiene como centro la fuente de calor.....	26
Figura 28-1.	Gráfica esfuerzo-deformación para acero estructural.....	28
Figura 1-2.	Juntas soldadas a tope.....	31
Figura 2-2.	Juntas soldadas a tope con bisel.....	32
Figura 3-2.	Falta de penetración. Placas de 6mm	32
Figura 4-2.	Soldadora LINCOLN ELECTRIC.....	33

Figura 5-2.	Horno para calentamiento de placas.	34
Figura 6-2.	Pirómetros	35
Figura 7-2.	Clasificación de zonas de aceros.....	41
Figura 8-2.	Tasa de enfriamiento crítico para 350 HV Y 400 HV	42
Figura 9-2.	Soldaduras de filete de una sola pasada con alma y ala del mismo espesor.	43
Figura 10-2.	Soldaduras de filete de una sola pasada con ala de 6mm y alma de espesor variable.....	44
Figura 11-2.	Soldaduras de filete de una sola pasada con ala de 1/2 in (12mm) y alma de espesor variable.....	44
Figura 12-2.	Soldaduras de filete de una sola pasada con ala de 1 in (25mm) y alma de espesor variable.....	45
Figura 13-2.	Soldaduras de filete de una sola pasada con ala de 2 in (50mm) y alma de espesor variable.....	45
Figura 14-2.	Soldaduras de filete de una sola pasada con ala de 4 in (100 mm) y alma de espesor variable.....	46
Figura 15-2.	Procedimiento para la obtención de cupones de soldadura.	55
Figura 16-2.	Pasos para la aplicación de PT.....	61
Figura 17-2.	Kit de tintas penetrantes, limpiador, tinta y revelador.....	62
Figura 18-2.	Proceso para la aplicación de tintas penetrantes.....	62
Figura 19-2.	Portaliijas.....	63
Figura 20-2.	Pulidora	64
Figura 21-2.	Probetas con acabado superficial tipo espejo. ASTM A36	64
Figura 22-2.	Probetas con acabado superficial tipo espejo. ASTM A572 Gr.50	64
Figura 23-2.	Identador Vickers	65
Figura 24-2.	Equipo para medición de microdureza Vickers.....	65
Figura 25-2.	Probeta de tracción.	66
Figura 26-2.	Probeta de tracción software Nx.	67
Figura 27-2.	Fresadora CNC ROMI D600	68
Figura 28-2.	Sujeción de placas soldadas.	68
Figura 29-2.	Obtención de probetas de tracción.	68
Figura 30-2.	Probetas para ensayos de tracción ASTM 36.....	69
Figura 31-2.	Probetas para ensayos de tracción ASTM 572 Gr.50	69
Figura 32-2.	Máquina Universal.....	70
Figura 33- 2.	Dimensiones de probetas de impacto	71
Figura 34-2.	Mecanizado de probetas de impacto en rectificadora plana.	72
Figura 35-2.	Mecanizado de muesca- ensayo de impacto.....	72
Figura 36-2.	Probetas de para ensayo de impacto.....	73

Figura 37-2.	Péndulo Charpy	73
Figura 1-3.	Determinación de N.T.S.	77
Figura 2-3.	Determinación de Índice de soldabilidad.	77
Figura 3-3.	Temperatura de precalentamiento B.W.R.A	78
Figura 4-3.	Localización de zonas de aceros.	80
Figura 5-3.	Índice de Susceptibilidad ASTM A36.	82
Figura 6-3.	Índice de Susceptibilidad ASTM A572 Gr. 50	82
Figura 7-3.	Determinación de temperatura de precalentamiento Anexo H.	83
Figura 8-3.	Microestructuras teóricas. Acero ASTM A36.....	105
Figura 9-3.	Medición de tamaño de grano.....	108
Figura 10-3.	Identificación de probetas de tracción.....	137

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-3.	Ciclo térmico Acero ASTM A36. Sin precalentamiento	93
Gráfico 2-3.	Ciclo térmico Acero ASTM A572 Gr.50. Sin precalentamiento (18°C)	95
Gráfico 3-3.	Ciclo térmico Acero ASTM A36. Precalentamiento 115°C.	96
Gráfico 4-3.	Ciclo térmico Acero ASTM A572 Gr.50. Precalentamiento 115°C.	98
Gráfico 5-3.	Ciclo térmico Acero ASTM A36. Precalentamiento 300°C.	99
Gráfico 6-3.	Ciclo térmico Acero ASTM A572 Gr.50. Precalentamiento 300°C.	101
Gráfico 7-3.	Ciclo térmico Acero ASTM A36. Precalentamiento 500°C.	102
Gráfico 8-3.	Ciclo térmico Acero ASTM A572. Gr50. Precalentamiento 500°C.	104
Gráfico 9-3.	Perfil de durezas Acero ASTM A36.....	132
Gráfico 10-3.	Perfil de durezas Acero ASTM A572 Grado 50.....	133
Gráfico 11-3.	Comparación de Microdureza para juntas de acero ASTM A36.	133
Gráfico 12-3.	Comparación de Microdureza para juntas de acero ASTM A572.	135
Gráfico 13-3.	Comparación de resultados de ensayos de tracción ASTM A572 Gr.50.	141
Gráfico 14- 3.	Tamaño de grano ASTM - Resistencia a la Tracción ASTM A572 Gr.50.....	142
Gráfico 15-3.	Comparación de resultados de ensayos de tracción ASTM A36	144
Gráfico 16-3.	Tamaño de grano ASTM - Resistencia a la Tracción acero ASTM A36.....	145
Gráfico 17-3.	Comparación de resultados de ensayos de impacto ASTM A572 Gr.50	150
Gráfico 18-3.	Comparación de resultados de ensayos de impacto ASTM A36	151

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: CORRELACIONES EMPÍRICAS DEL NÚMERO PROMEDIO DE NUSSELT
PARA LA CONVECCIÓN NATURAL SOBRE SUPERFICIES

ANEXO C: REPORTE DEL ENSAYO DE TRACCIÓN

ANEXO D: REPORTE DEL ENSAYO DE IMPACTO

RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo de titulación fue estudiar el efecto de las temperaturas de precalentamiento sobre la microestructura y propiedades mecánicas en juntas soldadas de acero ASTM A36 y ASTM A572 Gr. 50, soldadas mediante proceso SMAW. Se realizó juntas sin precalentamiento y también con temperaturas de precalentamiento de 115°C, 300°C y 500°C. El electrodo empleado fue el E6011. Las temperaturas de precalentamiento se controlaron mediante un pirómetro. Para el precalentamiento se empleó un horno de inducción eléctrico con control de temperatura. Adicionalmente, para el calentamiento de las placas de dimensiones mayores se empleó una antorcha de GLP, con una placa de protección con el fin de que el hollín generado no afecte a las propiedades finales. Posteriormente se realizaron ensayos metalográficos y mecánicos para determinar las propiedades de cada junta. Mediante un análisis metalográfico de las muestras se evidencia que, en la zona afectada por el calor, se forman microestructuras como ferrita acicular y Widmanstatten con presencia de listones de Bainita y a medida que la temperatura de precalentamiento aumenta estos van disminuyendo. Posterior a esto se realizan el ensayo de microdureza Vickers en cada junta, el mismo que evidencia una disminución de valores de microdureza a medida que la temperatura de precalentamiento aumenta esto en el Cordón y la ZAC. En cuanto a propiedades mecánicas, el ensayo de tracción evidenció que mediante la aplicación de un precalentamiento la resistencia a la tracción aumenta. Mientras que, mediante el ensayo de impacto Charpy se evidenció que la resistencia al impacto baja mientras que la temperatura de precalentamiento aumenta. Finalmente, los resultados obtenidos son comparados con el tamaño de grano calculado que se ve refinado a medida que aumenta la temperatura de precalentamiento.

Palabras clave: <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <MECÁNICA>, <SOLDADURA POR ARCO ELÉCTRICO (SMAW)>, <ACERO ASTM A36- ASTM A572>, <TEMPERATURA DE PRECALENTAMIENTO>, <MICROESTRUCTURA>, <PROPIEDADES MECÁNICAS>, <TAMAÑO DE GRANO>.



Firmado electrónicamente por:
JHONATAN RODRIGO
PARREÑO UQUILLAS



10-12-2020

0493-DBRAI-UPT-2020

ABSTRACT

The main objective of this research was to study the effect of preheating temperatures on the microstructure and mechanical properties of welded joints made of ASTM A36 and ASTM A572 Gr. 50 steel, welded using the SMAW process. Joints were made without preheating and with preheating temperatures of 115°C, 300°C and 500°C. The electrode used was E6011. Preheat temperatures were monitored by a pyrometer. An electric induction oven with temperature control was used for preheating. Additionally, to heat the plates of larger dimensions, a LPG torch was used, with a protection plate so that the soot generated does not affect the final properties. Subsequently, metallographic, and mechanical tests were carried out to determine the properties of each joint. By means of a metallographic analysis of the samples, it is evidenced that, in the heat affected zone, microstructures such as acicular ferrite and Widmanstatten are formed with the presence of Bainite slats and as the preheating temperature increases, they decrease. After this, the Vickers microhardness test is carried out in each joint, which shows a decrease in microhardness values as the preheating temperature increases this in the Cordon and the HAZ. Regarding mechanical properties, the tensile test showed that by applying a preheating the tensile strength increases. While, through the Charpy impact test, it was evidenced that the impact resistance decreases while the preheating temperature increases. Finally, the results obtained are compared with the calculated grain size that is refined as the preheating temperature increases.

Keywords: <TECHNOLOGY AND ENGINEERING SCIENCES>, <MECHANICS>, <ELECTRIC ARC WELDING (SMAW)>, <ASTM A36- ASTM A572 STEEL>, <PREHEATING TEMPERATURE>, <MICROSTRUCTURE>, <MECHANICAL PROPERTIES>, <GRAIN SIZE>.

INTRODUCCIÓN

El acero ASTM A36 y ASTM A572 GR. 50 son ampliamente utilizados en la fabricación de planchas y perfiles estructurales, los cuales se usan en la construcción de estructuras metálicas. En la actualidad estas están siendo empleadas en grandes construcciones debido a que se logra disminuir peso en comparación con edificaciones y proyectos que ocupan hormigón, también presentan alta resistencia. El proceso de soldadura que se emplea ampliamente en campo es el proceso SMAW (*Shielded Metal Arc Welding* o soldadura de arco metálico protegido) ya que es económico y presenta una gran facilidad de trabajo, por esta razón este trabajo de titulación pretende determinar los efectos que causa el precalentamiento en microestructuras y propiedades mecánicas de las juntas soldadas mediante proceso SMAW en aceros estructurales, determinando si se puede realizar el precalentamiento para ayudar a disminuir defectos que en ocasiones se presentan. Entre ellas; evita el agrietamiento tanto en frío como en caliente en el metal de la soldadura o en la zona afectada por el calor.

Las microestructuras formadas en el metal de soldadura y en la ZAC tienen un papel importante para el control de las propiedades mecánicas finales de la junta. La entrada de calor y la velocidad de enfriamiento tienen influencia directa en las microestructuras resultantes en el metal de soldadura y la ZAC. Con la necesidad de resolver los defectos presentes en la soldadura, es de gran importancia realizar un estudio con el cual se pueda observar los efectos de precalentamiento en juntas de diferentes aceros estructurales soldados mediante proceso SMAW, tanto en propiedades mecánicas como en la microestructura. Con los resultados obtenidos a partir de esta experimentación e investigación se pretende brindar información sobre el precalentamiento en placas soldadas de espesores menores a 10mm ya que existen estudios realizados espesores mayores y en muchas ocasiones las estructuras metálicas se construyen a partir de perfiles, vigas y planchas de espesores bajos por lo cual es importante que esta información sea conocida por personas dedicadas a la construcción de estructuras metálicas con el fin de obtener conexiones más seguras minimizando los defectos.

Finalmente, se comparará los valores obtenidos en ensayos mecánicos y microestructurales de juntas soldadas a diferentes temperaturas de precalentamiento con una junta a la que no se le realizó ningún tratamiento previo, para evidenciar así lo que sucede al aplicar precalentamiento ofrece a la soldadura final.

Problematización

En la actualidad a nivel mundial y especialmente en nuestro país existe un avance significativo en el área de la construcción de edificaciones a partir de estructuras metálicas, al usar juntas soldadas de acero estructural es indispensable garantizar que éstas cumplan con estándares de calidad. En muchas ocasiones este tipo de juntas presentan discontinuidades de soldadura o presentan defectos como fisuraciones tanto en frío como en caliente. Lo mismos que bajan su desempeño y resistencia a los esfuerzos a los que están sometidos.

El proceso (SMAW) es un proceso de soldadura ampliamente utilizado, no solo en edificaciones también en mega proyectos la tendencia indica que se está reemplazando el hormigón por estructuras metálicas, este tipo de soldadura se usa en trabajos de fabricación y mantenimiento en campo. Conocer los cambios en la microestructura y por ende en propiedades mecánicas al realizar un precalentamiento en juntas soldadas de acero ASTM A36 y ASTM A572 Gr.50, es de fundamental importancia ya que estos son ampliamente utilizados en el área de la construcción de estructuras metálicas. Por otro lado, no existe información amplia sobre los cambios que experimenta una junta soldada de espesores menores a 10mm, por lo cual conocer un procedimiento adecuado que brinde propiedades mecánicas diferentes y donde se observe los cambios que pueden aportar al realizar este tipo de procedimientos en una junta soldada por el proceso SMAW, se convierte en un factor primordial en el área de la construcción de estructuras metálicas.

Justificación

Justificación teórica

Con el fin de proporcionar información confiable tanto a la institución como a las empresas y a personas que se dedican a la aplicación innovación e investigación en el área de soldadura. Se realiza, inicialmente un estudio teórico con artículos, manuales y normas de gran relevancia en esta área, creando así un conocimiento previo para poder combinar la teoría con la práctica y posteriormente la aplicación en la interpretación de los resultados de ensayos metalográficos y mecánicos para posteriormente poder aplicar el proceso de soldadura en la industria y construcción de estructuras metálicas si este resultara beneficioso.

Justificación metodológica

Se elaboran juntas soldadas empleando un proceso de soldadura por arco eléctrico, mediante la aplicación de temperaturas de precalentamiento para compararlas con juntas soldadas sin precalentamiento, en las cuales el proceso de soldadura es experimental, depende del espesor y de dichas temperaturas. Para posteriormente evaluar los cambios microestructurales y propiedades mecánicas con la realización de ensayos, los mismos que podrán ser usados para trabajos de investigación futuros en la escuela de Ingeniería Mecánica o por parte de empresas o personas que trabajan en el área de la soldadura y en construcción de estructuras metálicas con el fin de obtener conexiones más seguras minimizando los defectos.

Justificación práctica

Con el fin de profundizar en los conocimientos ingenieriles adquiridos, se busca mediante el uso de la soldadura por arco eléctrico, determinar si la aplicación de un precalentamiento en juntas soldadas es viable o no para aceros estructurales que son ampliamente utilizados en conexiones estructurales soldadas como vigas y planchas y así observar si este parámetro influye o no, tanto en la microestructura como en las propiedades mecánicas de la junta. Tomando en cuenta que la soldadura por arco eléctrico es uno de los procedimientos más utilizados en la industria. Adicionalmente se busca generar conocimientos válidos que puedan ser aplicados en la industria y en la construcción de estructuras metálicas.

Alcance

El alcance de este trabajo de titulación tiene como finalidad determinar los efectos que causa el precalentamiento de juntas de acero ASTM A36 de espesor 6 milímetros y ASTM A572 Gr. 50 de espesor 4 milímetros soldadas mediante proceso SMAW. Los espesores seleccionados se deben a que existen estudios similares para espesores mayores, pero en la industria de la construcción de estructuras metálicas se emplean vigas y planchas de espesores menores a 10mm, adicionalmente al emplear un espesor mayor y emplear un precalentamiento es necesario mantener una temperatura entre pases que sea similar a la del precalentamiento lo cual con lleva tiempos adicionales. Además, se seleccionó el proceso de soldadura por arco eléctrico (SMAW), debido a que es el más utilizado en este tipo de conexiones soldadas, tomando en cuenta que es de fácil transporte y más accesible económicamente para cualquier industria o empresa en

comparación con otros procesos de soldadura. El calentamiento previo se lo realizará a temperaturas diferentes para compararlas con muestras en las que no se realizó un precalentamiento con el fin de observar los resultados mediante la aplicación de las mismas.

Objetivos

Objetivo General

Determinar los efectos de la temperatura de precalentamiento sobre la microestructura y propiedades mecánicas de aceros estructurales ASTM A36 y ASTM A572 Gr. 50 soldados mediante proceso SMAW.

Objetivos Específicos

- Determinar las temperaturas de precalentamiento adecuadas para cada tipo de acero estructural propuesto.
- Obtener juntas soldadas mediante proceso SMAW, sin precalentamiento y con diferentes temperaturas de precalentamiento determinadas previamente.
- Realizar ensayos de tracción e impacto para determinar las propiedades mecánicas de las juntas soldadas.
- Obtener la microestructura para cada tipo de junta soldada con y sin precalentamiento.
- Obtener el perfil de durezas para cada tipo de junta propuesta y con diferentes temperaturas de precalentamiento.

Antecedentes

En el Ecuador y a nivel mundial, en la actualidad la tendencia indica que se está reemplazando el hormigón por estructuras metálicas, no solo en edificaciones también en mega proyectos (Howard , 2010). A medida del avance tecnológico, el estudio de los materiales ha crecido de manera abundante, así como también los procesos que intervienen en este campo, como lo son los procesos de soldadura que tras varios años de investigación generan alternativas para establecer procesos que sean de calidad (Sailema, 2014, pp. 6-8).

La industria ha empleado varios materiales en el sector de la construcción y en la búsqueda por encontrar materiales con mejores propiedades mecánicas, el acero ASTM A36 es ampliamente usado por su bajo costo y propiedades mecánicas aceptables, mientras que, el acero ASTM A572 Gr. 50 se ha utilizado últimamente con muy buenos resultados en vigas que se emplean en la construcción estructural (Sanchez & Rincón, 2018).

En artículos de revistas, tesis y estudios de post grado de varias universidades tanto en el país como a nivel internacional, se investigan los efectos de los tratamientos térmicos en las soldaduras. Por ejemplo, en la Universidad Nacional de Colombia se ha desarrollado un estudio realizado por Francisco Gómez, denominado “Influencia de la entrada de calor en la características mecánicas y microestructurales finales de la zona afectada por el calor en uniones soldadas en tubería para transporte de hidrocarburos” en la cual se evalúan diferentes cupones de soldadura de espesor 12 mm, elaborados con diferentes entradas de calor realizadas con la variación de los parámetros de soldadura para cada junta, donde se obtiene como resultado que la propiedad de resistencia a tensión disminuye con el aumento en la entrada de calor en la junta soldada, mientras que en las propiedades metalúrgicas una evaluación metalográfica presenta microestructuras ferríticas, bainíticas, perlíticas y poca presencia de austenita retenida (Gómez, 2016). En el estudio de la influencia de precalentamiento de igual forma se varía la entrada de calor debido a la velocidad de avance para cada junta elaborada a diferente temperatura de precalentamiento.

Por otro lado en un estudio realizado en la universidad Nacional de Buenos Aires por Eduardo Asta denominado “ Efecto de la temperatura de precalentamiento en la soldabilidad del acero ASTM 514 Gr B”, en el cual se evalúa la soldabilidad con la relación de temperatura de precalentamiento, se evidencia que mediante la aplicación de un precalentamiento de 150°C minimiza el riesgo de fisuras en comparación con la junta soldada sin precalentamiento (Asta, 2003, pp. 127-129).

El estudio de investigación desarrollado por la Escuela Superior Politécnica del Ejército, denominado “ Estudio de las transformaciones metalúrgicas y variación de las propiedades mecánicas en juntas soldadas de acero ASTM 588 y ASTM A36 realizado por Carlos Naranjo y Estefanía Tobar donde concluyen que al aplicar un precalentamiento de 230°C a juntas soldadas de cada tipo de acero con espesor de 12mm y 24mm se observa que no existe una variación considerable ni negativa en cuanto a propiedades mecánicas y estructura metalográfica que con las cuales se pueda afectar el desempeño de la junta con la misma temperatura de precalentamiento y con los mismo parámetros por lo cual determinan que con un solo

procedimiento que abarque estos materiales y espesores se garantiza la efectividad de las juntas soldadas (Sanchez & Tobar, 2015, pp. 3-7).

El artículo de investigación científica de la revista INGE CUC, de la ciudad de Bogotá- Colombia, denominado “Determinación de las causas de falla en la ZAC de un acero ASTM A36 soldado por proceso SMAW” realizado por Mónica Melgalejo y Carlos Ramírez. En donde emplean juntas de acero ASTM A36 seleccionadas de un tubo de transporte de crudo de 6 pulgadas de diámetro unido a tope mediante proceso SMAW, en donde el estudio demuestra que los cambios microestructurales en la ZAC inciden en la formación de discontinuidades. Adicionalmente, concluyen que es importante determinar un proceso adecuado que dé como resultado un tamaño de grano un poco más grande lo cual ayuda a que los esfuerzos propaguen grietas. Por lo cual la aplicación de algún tratamiento térmico a junta soldada beneficia al control del crecimiento de grano (Melgalejo y Ramírez, 2013, pp. 75-82).

En todos los estudios, revisados se observa que la aplicación de un tratamiento térmico a la soldadura no afecta de forma adversa al desempeño de la junta, en la mayoría de casos de estudio la aplicación de un precalentamiento mejora las propiedades mecánicas de las soldaduras. Al no haber un estudio en el cual se empleen espesores menores a 10mm, se observa la necesidad de realizar la presente investigación con el fin de determinar la influencia de un precalentamiento en juntas soldadas.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEORICO

En el presente capítulo se detalla todo lo relacionado con el marco referencial en el cual se recopila información suficiente para el desarrollo de la investigación, se describen temas como: procesos de soldadura, proceso SMAW, defectos de la soldadura, velocidad de enfriamiento, precalentamiento en juntas soldadas y propiedades de acero estructural, entre los temas más importantes.

1.1. Marco teórico conceptual

1.1.1. Soldadura

Según la Sociedad América de Soldadura (AWS), se define a la soldadura como la unión de dos metales que se produce por el calentamiento a temperaturas muy altas, con o sin aplicación de presión y que puede o no tener material de aporte, el mismo que produce la unión mediante fusión o recristalización en el área soldada. (American Welding Society, 2001).

1.1.1.1. Historia de la Soldadura

La soldadura no se puede precisar con exactitud cuando se inició. Pero durante la Edad Media, se desarrolló el arte de la herrería y se produjeron muchos artículos de hierro que se soldaron con un martillo. No fue hasta el siglo XIX cuando se inventó la soldadura como la conocemos hoy (Rodriguez, 2013).

A Edmund Davy de Inglaterra se le atribuye el descubrimiento de acetileno en 1836. La producción de un arco eléctrico con electrodos de carbono se acredita a Sir Humphry Davy en 1800. A fines del siglo XIX, se desarrolló la soldadura con gas y también la soldadura por arco de metal y la soldadura por resistencia se convirtió en un proceso más común. (McCorman & Csernak, 2013, p. 469)

Aproximadamente en 1900, Strohmenger introdujo un electrodo de metal revestido en Gran Bretaña. Había una fina capa de arcilla o cal, pero proporcionaba un arco más estable. Oscar Kjellberg de Suecia inventó un electrodo recubierto durante el período de 1907 a 1914. Los electrodos de barra se produjeron sumergiendo trozos cortos de alambre de hierro desnudo en mezclas espesas de carbonatos y silicatos, permitiendo que el revestimiento se secase (McCorman & Csernak, 2013, p. 470).

La Primera Guerra Mundial trajo una gran demanda de producción de armamento y la soldadura se puso en servicio. Muchas empresas surgieron en América y en Europa para fabricar máquinas de soldadura y electrodos para cumplir con los requisitos (Howard , 2010).

Inmediatamente después de la guerra en 1920 se fundó la American Welding Society como una organización sin fines de lucro que a partir de su fundación se encargaría del avance de la soldadura y otros procesos relacionados. La corriente alterna fue inventada aproximadamente en 1919 por C.J. Holslag; sin embargo, no se usó hasta 1930, cuando el electrodo de revestimiento pesado encontró un uso generalizado. Durante la década de 1920, se desarrollaron varios tipos de electrodos de soldadura. En 1929, Lincoln Electric Company produjo barras de electrodos extruidos que se vendieron al público. En 1930, los electrodos cubiertos fueron ampliamente utilizados. Aparecieron códigos de soldadura que requerían metales de soldadura de mayor calidad, lo que aumentó el uso de electrodos cubiertos (Howard , 2010).

1.1.1.2. Ventajas de la soldadura

Entre las principales ventajas de la soldadura se pueden mencionar:

- Unión de forma permanente en metales.
- Ayudan a disminuir el peso de una estructura, ya que una junta empernada o atornillada implica mayores pesos.
- Disminuye cargas estáticas por concentradores de esfuerzos en uniones remachadas o empernadas.
- Por su facilidad de trabajo es ampliamente ocupada en campo.
- Posee menor costo que una junta atornillada o empernada. (McCorman & Csernak, 2013, p. 470)

1.1.1.3. Desventajas de la soldadura

De igual manera la soldadura implica algunas desventajas:

- Al ser una unión permanente, su desmontaje o desensamble no es recomendado.
- Posee defectos de resistencia y otras propiedades mecánicas principalmente en la zona afectada por el calor (ZAC).
- Para obtener una soldadura de calidad se recomienda el uso de mano de obra calificada, esto de igual manera implica costos (McCorman & Csernak, 2013, p. 470).

1.1.2. Clasificación de los procesos de soldadura

Existen varios procesos de soldadura, según la AWS estos pueden ser:



Figura 1-1. Procesos de soldadura

Fuente: (Pástor, 2002, p.4)

Realizado por: Medina, Erika; Vaca, Ronald. 2019

Uno de los procesos más populares es la soldadura por arco. En su gran mayoría los procesos utilizan energía eléctrica de una descarga de corriente entre el electrodo y el metal base para proporcionar el calor de fusión necesario. Las soldadoras por arco pueden usar corriente continua (CC) o alterna (CA) y electrodos consumibles o no consumibles. En la siguiente figura se muestran los procesos de soldadura por arco (American Welding Society, 2001).



Figura 2-1. Tipos de soldadura por arco eléctrico

Fuente: (West Arco, 2015, p.17-19)

Realizado por: Medina, Erika; Vaca Ronald. 2019

1.1.3. Soldadura SMAW

El término SMAW proviene de *Shielded Metal Arc Welding* (soldadura de arco metálico protegido). Este proceso que da lugar a la unión de metales, se produce por el alto calor que produce el arco eléctrico de la punta de un electrodo consumible y el metal base. (Miller Welds, 2018, p. 6)

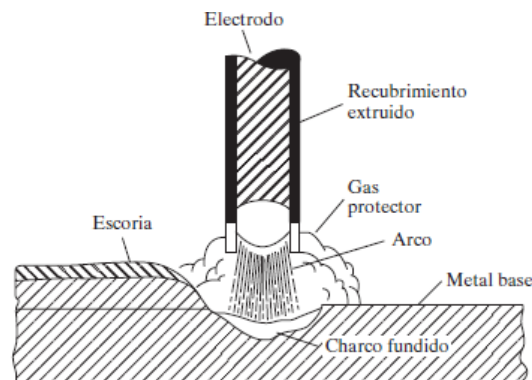


Figura 3-1. Soldadura SMAW

Fuente: (McCorman & Csernak, 2013, p.473)

1.1.3.1. Clasificación de electrodos

Los electrodos se pueden clasificar en metálicos y no metálicos. Como se muestra en la figura 4-1.

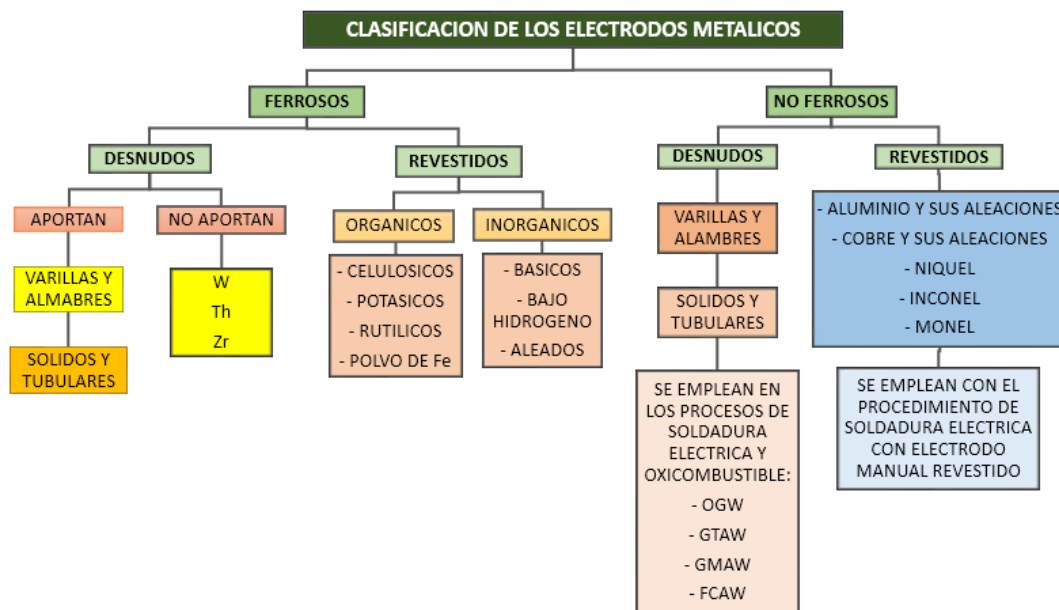


Figura 4-1. Clasificación de electrodos metálicos

Fuente: (Sánchez, 2018, p. 24)

1.1.3.2. Electrodo para aceros al carbono

Los electrodos o material de aporte son metales que poseen propiedades físico químicas idénticas a las del metal base. En la ANSI/ AWS 5.1 se encuentra la especificación de electrodos para aceros al carbono.

E XXYY

E: señala que el electrodo es para soldadura por arco manual.

XX: estos dígitos representan la resistencia mínima a la tracción del material de aporte en ksi.

YY: El primer dígito indica la posición en la que puede trabajar el electrodo, el segundo número indica el tipo de revestimiento y el tipo de corriente adecuada para cada electrodo.

R: esta letra indica que el electrodo cumple con la prueba de absorción de humedad.

El electrodo que se usa para esta soldadura debe poseer propiedades tales como resistencia, ductilidad y resistencia a la corrosión. Actualmente se fabrican diferentes tipos de electrodos, y cada uno es utilizado dependiendo del tipo de metal que se suelda, la cantidad de material que se necesita depositar, la posición del trabajo, entre otros parámetros de soldadura (McCorman & Csernak, 2013, p.473).

Según la AWS A5.1 los electrodos para soldadura de arco de aceros al carbono son los que se muestran en la tabla a continuación:

Tabla 1-1: Electrodos para aceros al carbono.

Clasificación AWS		Tipo de revestimiento	Posición a soldar	Corriente y polaridad
A 5.1	A 5.1 M			
E-6010	E-4310	Celulósico sódico	P, V, SC, H	CCEP
E-6011	E-4311	Celulósico potasico	P, V, SC, H	CA, CCEP
E-6012	E-4312	Rutilico sódico	P, V, SC, H	CA, CCEN
E-6013	E-4313	Rutilico potasico	P, V, SC, H	CA, CCAP
E-6018	E-4318	Potásico, BH –HP	P, V, SC, H	CA, CCEP
E-6019	E-4319	Oxido de hierro, rutilico potasico	P, V, SC, H	CA, CCAP
E-6020	E-4320	Óxido de hierro	H	CA, CCEN
			P	CA, CCAP
E-6022	E-4322	Óxido de hierro	P,H	CA, CCEN
E-6027	E-4327	Óxido de hierro, HP	H	CA, CCEN
			P	CA, CCAP
Nomenclatura		CC: Corriente continua	EP: Electrodo positivo	P: Plana
	HP: Hierro en polvo	CA: corriente alterna	EN: Electrodo negativo	V: Vertical
	BH: Bajo Hidrógeno	AP: Ambas polaridades	Sc: sobre cabeza	H: Horizontal

Fuente: (Indura, 2017, p.31)

Para aceros estructurales la AWS A5.1 recomienda el uso de electrodos de la serie E60XX y dependiendo del espesor de placas también recomienda el uso de electrodos de la serie E70XX.

1.1.3.3. Equipo de soldadura SMAW

El equipo de soldadura que se utiliza para este proceso se observa en la siguiente figura:

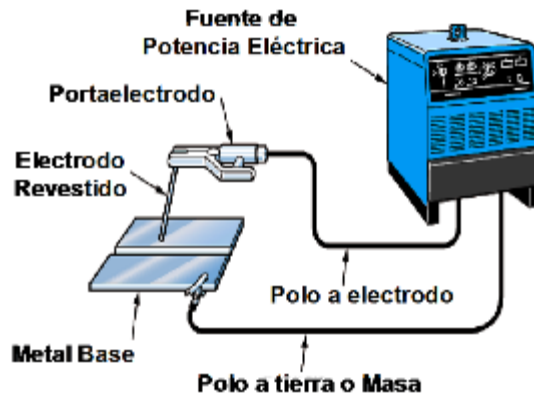


Figura 5-1. Equipo para soldadura SMAW.

Fuente: (Aguilar, 2014)

Es de gran importancia conocer los siguientes parámetros de la máquina para soldadura.

- Voltaje de arco

Este voltaje es el que existe entre el electrodo y la pieza de trabajo cuando se está soldando, depende de la longitud de arco para cada tipo de electrodo. Su valor oscila entre 17V y 40V. (American Welding Society, 2001, p.47)

- Voltaje de circuito abierto

Es el voltaje que posee la maquina cuando no se realiza el trabajo de soldado, este se encuentra generalmente entre 50V y 100V. (American Welding Society, 2001, p.48).

El voltaje de circuito abierto desciende hasta el voltaje de arco cuando la maquina soldadora se enciende y se empieza a realizar el trabajo. La longitud de arco y el electrodo que se usa en la soldadura determinan el voltaje, si el arco aumenta, el voltaje de arco lo hará de la misma manera pero la corriente disminuye. Este fenómeno se determina mediante la pendiente de la curva Voltaje- amperaje. (American Welding Society, 2001, p.48).

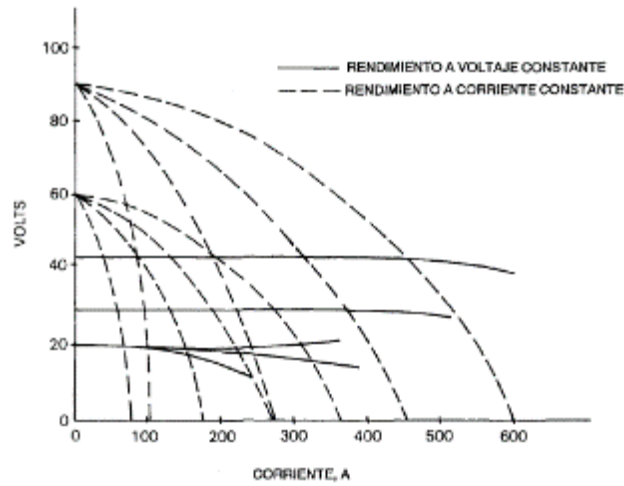


Figura 6-1. Curva Voltaje- amperaje

Fuente: (American Welding Society, 2001, p.48)

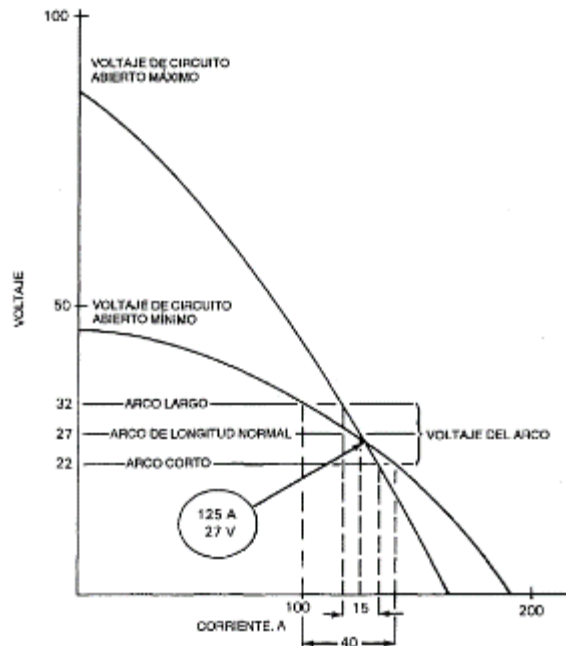


Figura 7-1. Efecto de la pendiente de la curva voltaje- amperaje

Fuente: (American Welding Society, 2001, p.49)

Hay que tomar en cuenta que con una pendiente menor se obtiene un mayor cambio de corriente para un cambio de voltaje de arco dado (Pástor, 2002, p.27).

En la soldadura SMAW utiliza fuentes de alimentación de soldadura de corriente constante porque sus características de salida le dan al soldador control sobre el tamaño del grupo de soldadura y aún limita la corriente de arco máxima. La forma de la curva de voltaje- corriente indica que

aumentar la longitud del arco reduce la corriente de soldadura y el tamaño del baño de soldadura (American Welding Society, 2001, p.48).

1.1.3.4. Ventajas de la soldadura SMAW

- El equipo que se usa es de bajo costo.
- Se pueden soldar muchos metales y aleaciones diferentes, incluidos los más utilizados.
- Relativamente portátil y se puede utilizar en espacios reducidos.
- Con diferentes configuraciones de corriente y diámetros de material de aporte, el mismo equipo puede soldar metales de diferente espesor. No hay un límite superior en el espesor del material que se puede soldar con SMAW.
- Las soldaduras se pueden realizar en cualquier posición.
- El proceso SMAW se ve menos afectado por las corrientes de aire, cuando se trabaja en campo. Lo que no sucede con otros procesos con gas como GMAW y GTAW. (Metal Arts Press, 2019)

1.1.3.5. Desventajas de la soldadura SMAW

- No apto para placas de metal de menos de 1/8 in de espesor.
- Se necesita de gran habilidad del soldador para un cordón de soldadura aceptable.
- La soldadura debe detenerse cuando se consume el electrodo y necesita ser reemplazado.
- No se puede usar todo el electrodo. El trozo restante en el portaelectrodos debe desecharse, desperdiciando más o menos una pulgada de cada electrodo.
- Las paradas y arranques frecuentes causados por el cambio de electrodos pueden provocar defectos de soldadura.
- El cordón puede tener inclusiones de escoria. (Metal Arts Press, 2019)

1.1.4. Clasificación de la soldadura

Para clasificar la soldadura se tomará en cuenta el tipo de soldadura que se realiza, la posición en la que se suelda y el tipo de junta que se prepara.

1.1.4.1. Tipo de soldadura

Los tipos más importantes de soldaduras son las *soldaduras de filete* y *de ranura*. Adicionalmente se encuentran las soldaduras de tapón y de muesca, las mismas son menos comunes en las construcciones estructurales. En la figura mostrada a continuación se muestran estos tipos de soldadura. (McCorman, y otros, 2013, p.478)

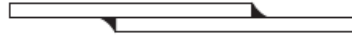


Figura 8-1. Soldadura de filete.

Fuente: (McCorman & Csernak, 2013, p.478)

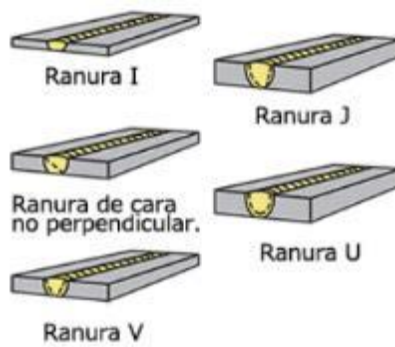


Figura 9-1. Soldadura de ranura simple.

Fuente: (Kobelco, 2013)

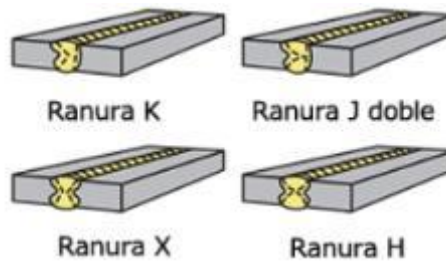


Figura 10-1. Soldadura de ranura doble.

Fuente: (Kobelco, 2013)

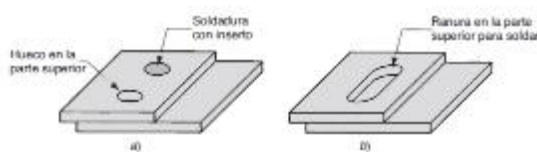


Figura 11-1. a) Soldadura de muesca. b) Soldadura de tapón.

Fuente: (McCorman & Csernak, y otros, 2013, p.476)

Para conexiones estructurales se usan generalmente la soldadura de filete, aunque presentan mejor resistencia pero la ventaja es que es menos costosa que una soldadura de ranura por el tipo de preparación que necesita la junta.

1.1.4.2. Posición de soldadura

La soldadura también se clasifica según la posición en la que se suelda. Estas pueden ser:

- Planas
- Horizontales
- Verticales
- Sobrecabeza.

Estos tipos de soldadura se observan en la figura 12-1.

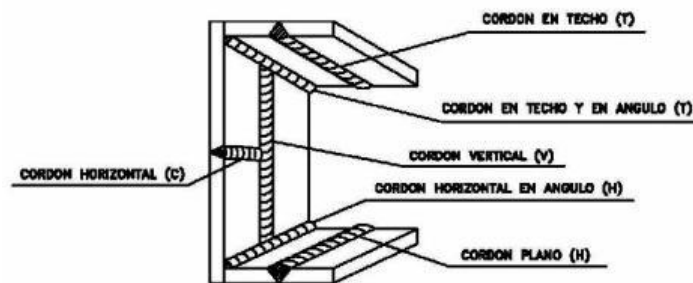


Figura 12-1. Tipos de soldadura por el tipo de posición.

Fuente: *(IngeMecánica, 2012)*

1.1.4.3. Tipos de juntas

De igual manera la soldadura se clasifica dependiendo el tipo de junta. Estos tipos son:

- A tope
- Traslape
- En te
- En esquina
- Junta de borde o canto

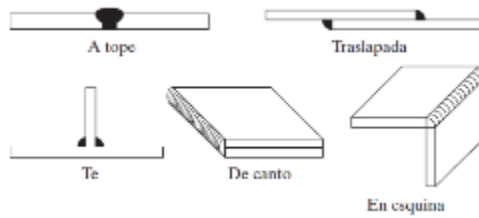


Figura 13-1. Tipos de juntas.

Fuente: (McCorman & Csernak, 2013, p.480)

1.1.5. Soldabilidad de aceros al Carbono

La soldabilidad se puede definir como la facilidad de obtener juntas de buena calidad. Una soldadura satisfactoria debe dar como resultado una soldadura sólida con propiedades químicas y mecánicas aceptables, así como costos razonables de la misma. No debe contener defectos de tales como grietas calientes y frías, fusión incompleta, falta de fusión, superposición, porosidad excesiva y socavada. Además, debe poseer una suficiente resistencia a la tracción, límite elástico, ductilidad, tenacidad de muesca, resistencia a la corrosión atmosférica requerida para la aplicación prevista (Kobelco, 2013).

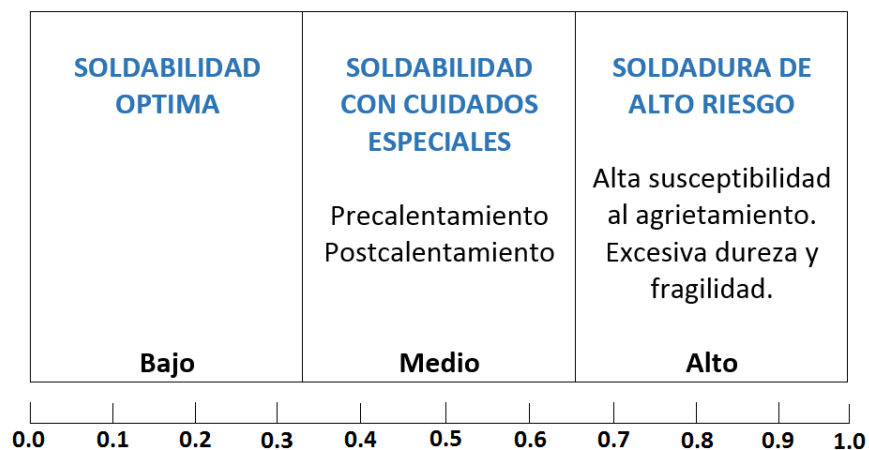


Figura 14-1. Efecto del Carbono en la Soldabilidad.

Fuente: (MIPSA, 2019)

1.1.6. Defectos de la Soldadura

Para la construcción de estructuras de acero como edificios y puentes y la fabricación de maquinaria como barcos, automóviles, material rodante y recipientes a presión, la soldadura por arco es el método indispensable para unir metales. Por lo tanto, la fiabilidad de las estructuras y maquinaria de acero depende de la calidad de las soldaduras y de la calidad de los materiales de acero. Para producir soldaduras satisfactorias que cumplan con los requisitos de calidad, la integridad del control de calidad es muy importante. Para un control de calidad integral, todo el personal (incluidos gerentes, ingenieros, inspectores, supervisores, capataces, soldadores y operadores de soldadura) que participan en la soldadura por arco debe tener un conocimiento adecuado de las imperfecciones de la soldadura y las medidas preventivas. (Kobelco Steel, 2015)

Las imperfecciones de soldadura se pueden clasificar en irregularidades de superficie y discontinuidades de soldadura. Las irregularidades de la superficie se pueden definir como "condiciones de la superficie de soldadura que contienen muescas o cambios repentinos en el espesor o la apariencia". Las irregularidades de la superficie incluyen ondulaciones de cordón de soldadura desiguales, soldaduras de filete excesivamente cóncavas o convexas, soldaduras de filete de pierna desiguales, socavado, salpicaduras, superposición y falta de penetración. Las discontinuidades de soldadura pueden definirse como "una irregularidad de la estructura normal de una soldadura, como la falta de uniformidad en las características mecánicas y metalúrgicas de la soldadura". Las discontinuidades de soldadura incluyen porosidades, inclusiones de escoria, fusión y penetración incompleta, fusión excesiva, grietas en frío y caliente. Sin embargo, una irregularidad de la superficie o la discontinuidad de la soldadura no es un defecto rechazable cuando está dentro del rango de extensión permitido de acuerdo con la especificación relevante. (Kobelco Steel, 2015)

1.1.6.1. Irregularidades de superficie

- *Ondas de cordón de soldadura desiguales:* Cambios bruscos en los perfiles de ondas de cordón de soldadura. Se produce por: amperaje o voltaje de soldadura demasiado bajo o alto, manipulación inadecuada del electrodo (irregular, demasiado rápido o demasiado lento), demasiada humedad en los recubrimientos (SMAW). (Kobelco Steel, 2015)

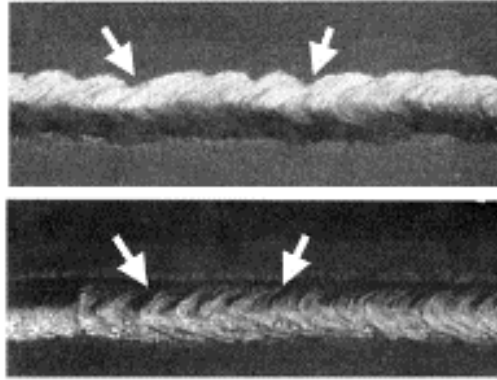


Figura 15-1. Ondas de cordón de soldadura desiguales.

Fuente: (Kobelco Steel, 2015)

- *Soldadura de filete cóncavo y convexo:* una soldadura de filete que tiene una concavidad o convexidad excesiva. Entre las causas principales tenemos: manipulación de electrodos demasiado rápida, uso demasiado alto amperaje de soldadura provocan una soldadura de filete cóncavo. Un amperaje de soldadura demasiado bajo o manipulación de electrodos demasiado lenta provoca soldadura de filete convexo. El ángulo de desplazamiento del electrodo es inapropiado. (Kobelco Steel, 2015)

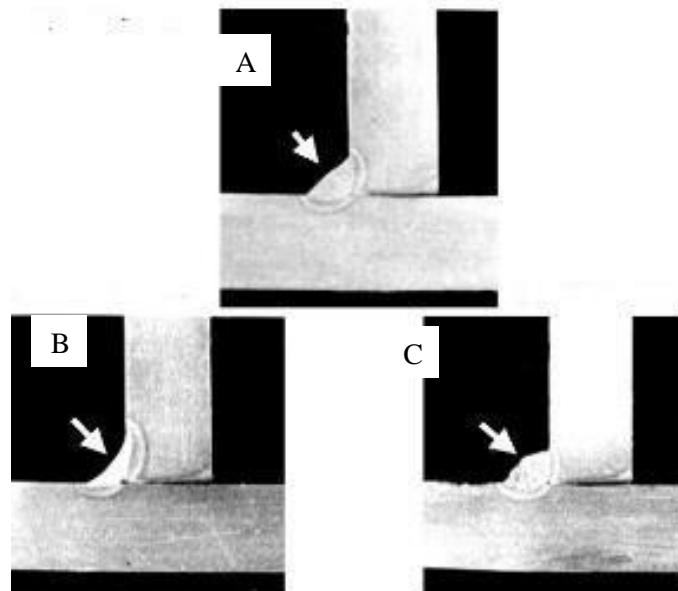


Figura 16-1. A. Buena soldadura de filete. B. Soldadura de filete cóncavo. C. Soldadura de filete convexo.

Fuente: (Kobelco Steel, 2015)

- *Socavados:* es el espacio del metal base junto a la raíz de soldadura y que queda sin relleno de metal de aporte. Se dan principalmente por: amperaje de soldadura demasiado alto,

manipulación de electrodos demasiado rápida, longitud de arco demasiado larga o voltaje de arco demasiado alto, el recorrido del electrodo y los ángulos de trabajo son inapropiados (Kobelco Steel, 2015).

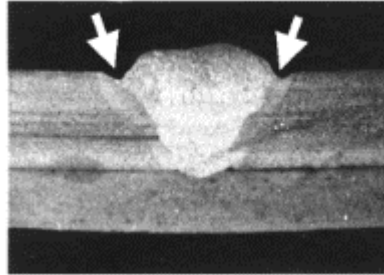


Figura 17-1. Socavados.

Fuente: (Kobelco Steel, 2015).

- *Sobre espesor en la soldadura:* la protuberancia del metal de aporte más allá de la raíz de la soldadura: este defecto se da por: amperaje de soldadura demasiado bajo, manipulación de electrodos demasiado lenta, longitud de arco demasiado corta o voltaje de arco demasiado bajo, el recorrido del electrodo y los ángulos de trabajo son inapropiados (Kobelco Steel, 2015).

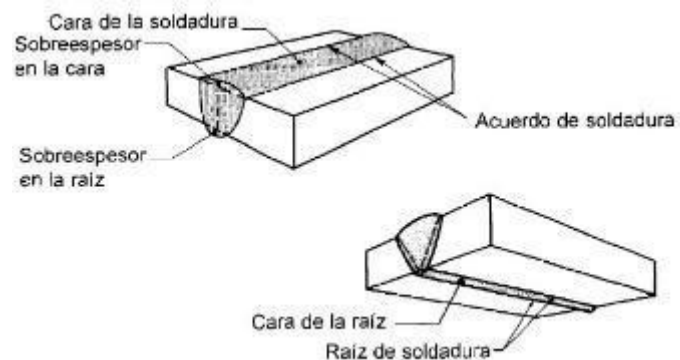


Figura 18-1. Sobre espesor en soldadura.

Fuente: (Rodriguez, 2013)

- *Falta de penetración:* es una depresión en la superficie o raíz de la soldadura que se extiende debajo de la superficie adyacente del metal base. Las causas principales: apertura de raíz demasiado pequeña, ángulo de ranura o demasiada cara de raíz. Amperaje demasiado bajo o arco demasiado largo. Manipulación inadecuada de electrodos. (Kobelco Steel, 2015)

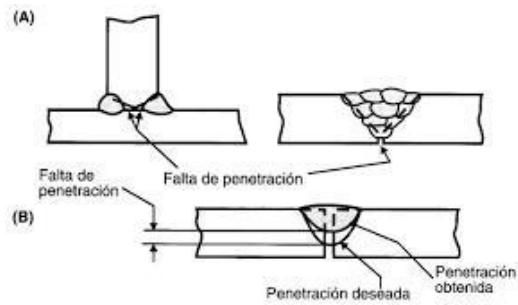


Figura 19-1. Falta de penetración en la soldadura.

Fuente: (Rodríguez, 2013)

1.1.6.2. Discontinuidades de soldadura:

- **Porosidades (PIT):** es un tipo cavidad formadas por atrapamiento de gas durante la solidificación del metal de soldadura. Las Causas principales: Óxido, aceite, pintura o humedad en las caras de fusión de la junta y alto contenido de azufre del metal base, Humedad en recubrimientos (SMAW), fundentes (SAW) o gases de protección (GMAW), muy poco gas de protección (GMAW) o altura de carga de flujo (SAW), viento fuerte (SMAW, GMAW) (Kobelco, 2013).

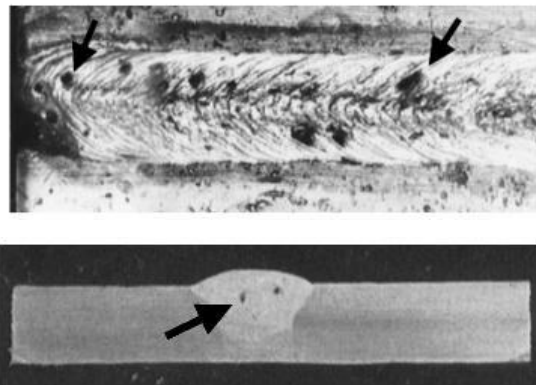


Figura 20-1. Porosidades

Fuente: (Kobelco Steel, 2015)

- **Inclusiones:** Materiales sólidos no metálicos atrapados en metales de soldadura o entre metal de soldadura y metal base. Las causas principales: amperaje de soldadura demasiado bajo, demasiada longitud de arco, demasiado ancho de tejido, ranura demasiado estrecha, escoria que permanece en la capa anterior, eje de soldadura inclinado hacia abajo a la dirección de soldadura en la posición plana (Kobelco, 2013).

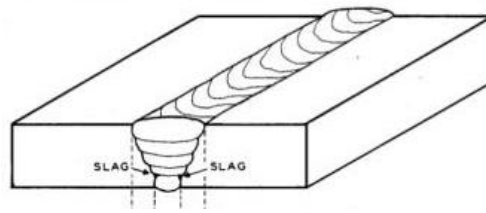


Figura 21-1. Inclusiones.

Fuente: (Howard , 2010)

- *Fusión incompleta:* una discontinuidad de soldadura en la que no se produjo fusión entre el metal de soldadura y la cara de fusión de la unión o entre cordones de soldadura contiguos. Se dan por: amperaje de soldadura demasiado bajo, manipulación de electrodos demasiado rápida o lenta, demasiada o muy poca longitud de arco o voltaje de arco, ranura de soldadura demasiado estrecha (Kobelco, 2013).

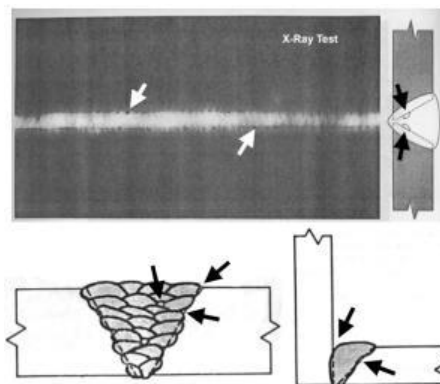


Figura 22-1. Fusión incompleta.

Fuente: (Kobelco Steel, 2015)

- *Penetración conjunta incompleta:* la penetración de la junta que es involuntariamente menor que el grosor de la junta de soldadura, se da por diferentes causas entre ellas están: ranura de soldadura demasiado estrecha, amperaje de soldadura demasiado bajo, demasiada longitud de arco o voltaje de arco, manipulación de electrodos demasiado rápida o demasiado lenta (Kobelco, 2013).

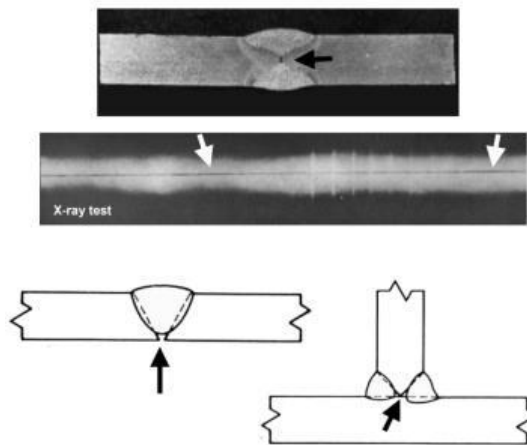


Figura 23-1. Falta de penetración

Fuente: (Kobelco Steel, 2015)

- *Fusión excesiva:* Un orificio a través del metal de soldadura, que generalmente ocurre en el paso de la raíz. Las causas principales son: demasiada apertura de la raíz, amperaje de soldadura demasiado alto. (Kobelco, 2013)

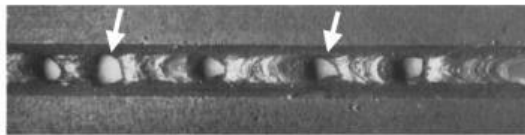


Figura 24-1. Fusión excesiva

Fuente: (Kobelco Steel, 2015)

- *Grietas en frío:* Una grieta que se desarrolla después de completar la solidificación del metal de soldadura a temperaturas inferiores a aprox. 200 ° C para acero. Se da por: Hidrógeno difusible en soldaduras, humedad en metal base y electrodos de soldadura, superficie contaminada con sustancias orgánicas, cambios de fase (por ejemplo, formación de martensita) durante el enfriamiento (Niebles & Arnedo, 2009).

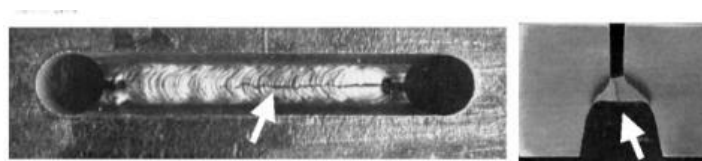


Figura 25-1. Grietas en frío.

Fuente: (Kobelco, 2013)

- *Grietas en caliente*: estas grietas en la soldadura que ocurre justo después las soldaduras se completan y en otras ocasiones mientras se realizan las soldaduras. Estas se desarrollan a altas temperaturas, se propaga entre los granos del material (intercristalino), ocurre en el metal de soldadura y a veces en ZAC (Kobelco, 2015).

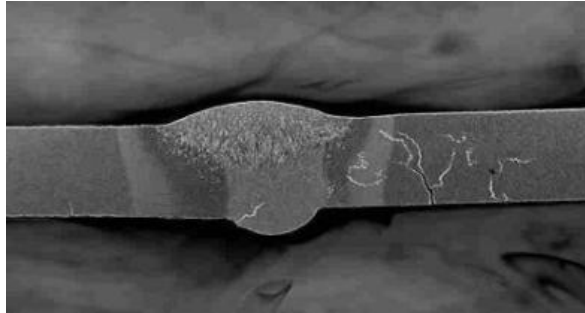


Figura 26-1. Grietas en caliente.

Fuente: (Kobelco Steel, 2015)

1.1.7. Influencia de la velocidad de enfriamiento

Determinar la velocidad de enfriamiento es de gran importancia; ya que, permite controlar la transformación martensítica y una posible fisuración en frío. Además, permite relacionar velocidades de enfriamiento, con diagramas CCT o registro de ensayos Jominy dependiendo del material que se esté soldando. Por otro lado, se puede identificar los posibles cambios de fase en la zona afectada térmicamente (Pástor, 2002, p. 72).

Las velocidades de enfriamiento disminuyen rápidamente a medida que el metal de la soldadura se enfría hasta la temperatura ambiente. Dichas velocidades son medidas experimentalmente mediante la pendiente de la curva Tiempo vs. Temperatura. En aceros, la temperatura de interés que se toma para medir estas velocidades oscila en el rango de 800 °C y 500°C (Pástor, 2002, p. 73).

Para soldaduras de placas finas que requieren menos de cuatro pasadas para obtener penetración completa,

1.1.7.1. Ciclo térmico de la zona afectada térmicamente

El metal base cercano a la soldadura se encuentra expuesto a altas temperaturas localizadas, dando como resultado la formación de la zona afectada por el calor. La parte extrema de la ZAC, esta

generalmente asociada con una temperatura pico mínima que causa un cambio microestructural observable en el metal base. Los datos de tiempo y temperatura a diferentes distancias de la fuente de calor, juegan un papel importante en la microestructura de la soldadura y sus propiedades (Pástor, 2002, p. 80).

Los investigadores Ashby y Easterling obtuvieron ecuaciones para el cálculo de las temperaturas de interés a diferentes distancias de la fuente puntual de calor, estas ecuaciones son válidas únicamente para el cálculo de temperaturas de la soldadura y la ZAC en cualquier instante después de la aplicación del calor. A los investigadores antes mencionados les sirvió como base los estudios de Rosenthal quien asumió que la energía de la fuente de calor se mueve con una velocidad constante v a lo largo del eje x de un sistema fijo de coordenadas como se muestra en la figura 27-1. (Pástor, 2002, p. 80).

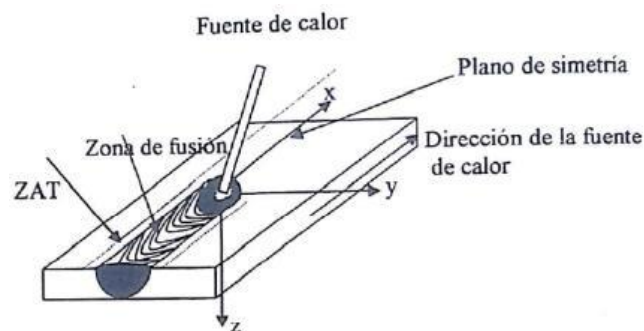


Figura 27-1. Diagrama de un proceso de soldadura.

Fuente: (Pástor, 2002)

1.1.8. Influencia del tamaño de grano en las propiedades de los aceros

Se conoce de antemano que las propiedades mecánicas de los metales y en especial de los aceros están determinadas por la microestructura que estos presentan y siendo más precisos, el que determina las mismas es el tamaño de grano. Entonces, es así que controlar su afinamiento o crecimiento ayuda a mejorar o cambiar las propiedades del metal, entre ellas: resistencia mecánica, dureza, resistencia al impacto, fatiga (Martínez et al., 2005: p.64). Debido a que en la soldadura el material experimenta altas temperaturas, se produce el crecimiento de grano de las zonas afectadas por la alta entrada de energía. (Lichan et al., 2005: p.578). Por lo tanto es de mucha importancia analizar el efecto de la energía del arco térmico en la microestructura y el tamaño de grano de estas uniones soldadas (Pástor, 2002: p.72).

1.1.9. Pre calentamiento de juntas soldadas

Es de gran importancia en aplicaciones de soldadura, el pre calentamiento de la junta a soldarse, ya que este procedimiento, reduce la velocidad de enfriamiento en una soldadura terminada, reduce la cantidad de hidrógeno en ella y reduce el riesgo de agrietamiento. La introducción artificial de calor en el metal base, mediante una fuente de calor externa, agrega un paso al proceso de soldadura; sin embargo, puede ahorrarle tiempo y dinero a largo plazo al reducir el potencial de una soldadura defectuosa que requiera un nuevo trabajo. (LINCOLN ELECTRIC , 2017)

El pre calentamiento implica calentar el metal base, ya sea en completamente o solo en la región que rodea la junta, a una temperatura específica deseada, llamada temperatura de pre calentamiento, antes de la soldadura. El calentamiento puede continuar durante el proceso de soldadura, pero con frecuencia el calor de la soldadura es suficiente para mantener la temperatura deseada sin una fuente de calor externa. La temperatura del paso intermedio, definida como la temperatura del metal base entre la primera y la última pasada, no puede caer por debajo de la temperatura de pre calentamiento. El pre calentamiento puede producir muchos efectos beneficiosos; sin embargo, sin un conocimiento práctico de los fundamentos involucrados, se corre el riesgo de gastar dinero o, lo que es peor, de degradar la integridad de la soldadura. (Niebles & Arnedo, 2009).

El pre calentamiento minimiza el diferencial de temperatura entre el arco y el metal base. Esto beneficia a la soldadura de varias maneras.

Primero, ayuda a disminuir las tensiones de contracción que pueden provocar grietas y distorsiones. Debido a que los materiales calientes se expanden y los fríos se contraen, una gran variación de temperatura entre el baño de soldadura fundida y el metal de base relativamente fresco puede generar tensiones internas a medida que la soldadura intenta normalizar esas diferencias de temperatura. Estas tensiones internas aumentan el riesgo de agrietamiento y distorsión. (Laufgang , 2013)

En segundo lugar, el pre calentamiento adecuado ayuda a disminuir la velocidad de enfriamiento de la soldadura terminada y reduce la dureza en la zona afectada por el calor (ZAC), que crea una soldadura menos quebradiza y más dúctil. Estas características son especialmente importantes para los materiales más susceptibles a la dureza a temperaturas elevadas, como el hierro fundido, el acero de alto y medio carbono o el acero de alta equivalencia de carbono. (LINCOLN ELECTRIC , 2017)

Al disminuir la velocidad de enfriamiento también se permite que el hidrógeno escape del charco de soldadura a medida que se endurece para ayudar a minimizar el agrietamiento.

Por último, el precalentamiento introduce el calor necesario en el área de soldadura para garantizar una penetración adecuada. Esto beneficia a los materiales de mayor espesor y aquellos que conducen el calor rápidamente. Al precalentar, puede usar menos calor en el arco de soldadura y aun así lograr una penetración óptima, ya que el material base comienza a una temperatura elevada. (Laufgang , 2013)

Existen variados métodos para determinar la temperatura a las que se calienta el metal base previo a la soldadura, entre los más utilizados tenemos el método de Seferian, método B.W.R.A y mediante el anexo H de la AWS D1.1 2015

1.1.10. Acero estructural

El acero utilizado en estructuras de ingeniería generalmente viene dado en dos tipos, el acero con bajo contenido de carbono, también llamado acero dulce y aceros de baja aleación, estos últimos tienen por objetivo aumentar la resistencia mecánica y a la corrosión. Las especificaciones de estos aceros generalmente están bajo norma ASTM, estos tipos de aceros están presentes en la construcción de puentes, edificios, barcos, perfiles estructurales, varillas, así como en la industria automotriz, electrodomésticos, transporte, etc. (Gerdau Aza, 2016)

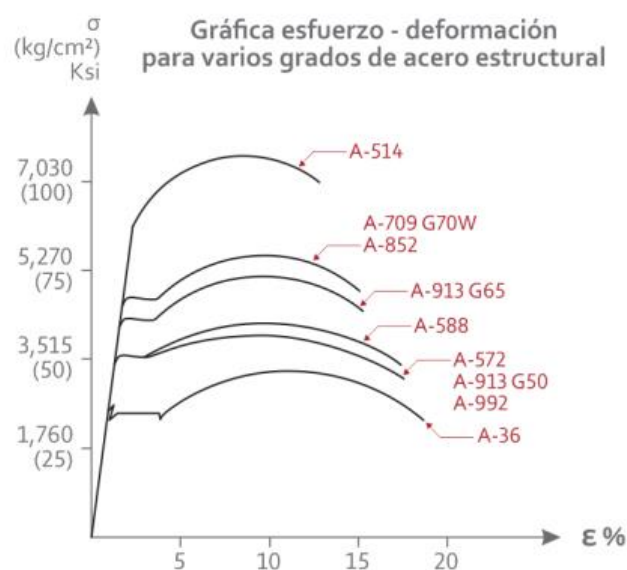


Figura 28-1. Gráfica esfuerzo-deformación para acero estructural

Fuente: (MIPSA, 2019)

CAPÍTULO II

2. Marco Metodológico

El diseño de juntas soldadas es muy importante en el presente estudio, ya que a partir de las mismas se van a obtener probetas tanto para ensayos destructivos, con el fin de establecer las propiedades mecánicas y también probetas para el realizar microscopia y dureza. Por lo tanto se debe garantizar el adecuado proceso de soldadura para obtener juntas soldadas de buena calidad.

En este capítulo se detalla el procedimiento de soldadura seguido para la obtención de cupones de soldadura para su análisis, se lo realizará en el laboratorio de fundición utilizando diferentes métodos de calentamiento de las placas hasta las temperaturas deseadas y tratando de controlar el proceso con el fin de obtener velocidades de enfriamiento de cada placa para la posterior elaboración de curvas de enfriamiento, mientras que la microestructura y dureza de juntas soldadas se analizarán en el laboratorio de Materiales de la Facultad de Mecánica de la Escuela Politécnica de Chimborazo (ESPOCH).

La obtención de probetas de tracción se realizó en el Laboratorio de CAD CAM de la Facultad de Mecánica, las probetas de impacto se las realiza mediante una rectificadora. Los ensayos mecánicos serán realizados en el laboratorio del Centro de Fomento Productivo Metalmeccánico Carrocero, ubicado en la ciudad de Ambato.

2.1. Materiales y Equipos

2.1.1. Aceros ASTM A36 y ASTM A572 Gr.50

2.1.1.1. Acero ASTM A36

El acero ASTM A36 es uno de los aceros más comunes y comerciales dentro de los aceros de tipo estructural. En el Ecuador es uno de los metales más utilizados para la construcción de estructuras, puentes y demás aplicaciones estructurales. (NEC, 2014)

Se encuentra bajo la norma ASTM A36, la misma se aplica en la manufactura de perfiles estructurales laminados en caliente y placas, tiene un esfuerzo de fluencia de 250 MPa (36 ksi) y una resistencia a la tracción de 400 a 550 MPa (58 a 80 ksi). (ASTM A36).

Tabla 1-2. Composición química de acero ASTM A36

Tipo	Laminas / Planchas				
	Hasta ¾" [20], incl.	Sobre 1¾" hasta 1½" [20 hasta 40], incl.	Sobre 1½" hasta 2½" [40 hasta 65], incl.	Sobre 2½" hasta 4" [65 hasta 100], incl.	Sobre 4" [100]
Carbono, máx. %	0,25	0,25	0,26		
Manganeso, máx. %	---	0,80 a 1,20	0,80 a 1,20	0,85 a 1,20	0,85 a 1,20
Fosforo, máx. %	0,04	0,04	0,04	0,04	
Azufre, máx. %	0,05	0,05	0,05	0,05	
Silicio, máx. %	0,4 máx.	0,40 máx.	0,15 a 0,40	0,15 a 0,40	0,15 a 0,40
Cobre, máx. % cuando se especifica acero de cobre	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

Fuente: (ASTM A36)

2.1.1.2. Acero ASTM A572 Gr.50

Es un tipo de acero estructural, es soldable y de baja aleación (Vanadio y Niobio), los mismos que actúan como afinadores de grano. Posee mejores propiedades mecánicas en comparación con el acero ASTM A36, y gracias a estas se reducen peso y espesores en estructuras como puentes, carrocerías, etc. (ASTM A572/A572M-07)

Tabla 2-2: Composición química acero ASTM A572.

	Grado 42 [290]	Grado 50 [345]	Grado 60 [415]	Grado 65 [450] thick >½ in.	Grado 65 [450] thick >½ in.
Carbono, máx.	0,21	0,23	0,26	0,23	0,26
Manganeso, máx.	1,35	1,35	1,35	1,65	1,35
Fosforo, máx.	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Azufre, máx.	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Silicio					
Placas hasta 1 ½ in. espesor	0,40	0,40	0,40	N/A	N/A
Placas sobre 1 ½ in. espesor	0,15 – 0,40	0,15 – 0,40	0,15 – 0,40		

Fuente: (ASTM A572/A572M-07)

2.1.1.3. Diseño de juntas soldadas

Para el proceso de soldadura por precalentamiento se utilizan planchas de acero estructural ASTM A572 Grado 50 de espesor 4mm y acero ASTM A36 de espesor 6mm. A partir de las cuales se elaborarán juntas soldadas. El diseño de juntas soldadas se lo realizará mediante el manual de soldadura de la AWS, el mismo que especifica que para espesores menores a 6mm (1/4 in) se realizan soldadura a tope y dependiendo del espesor se realiza o no un bisel.

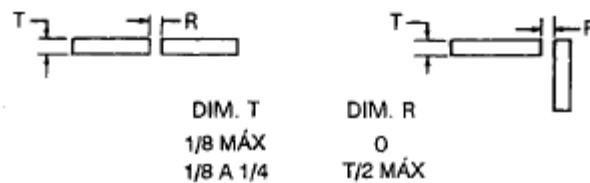


Figura 1-2. Juntas soldadas a tope.

Fuente: (Manual de Soldadura Tomo I AWS, 2001)

En la figura 8-2 se observa placas de espesor 1/8 in a 1/4 in (3,1mm – 6,3 mm), no se deben realizar el bisel para soldar y la soldadura se la realiza por ambos lados con una separación de 2mm para las placas de 4mm y con una separación de 3mm para las placas de 6mm. Como lo recomienda el manual de soldadura.

Para espesores superiores a 6mm se puede hacer realizar bisel, como se observa en la figura 9-2.

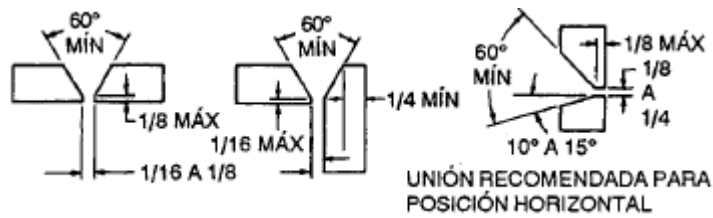


Figura 2-2. Juntas soldadas a tope con bisel.

Fuente: (Manual de Soldadura Tomo I AWS, 2001)

Para el caso de las placas de 6mm se realizó un cordón de soldadura a cada lado, donde se observó que existía falta de penetración en el centro de la junta por lo cual se optó por realizar dos cordones por cada lado, y así; garantizar una penetración total.



Figura 3-2. Falta de penetración. Placas de 6mm

Realizado por: Medina, E; Vaca, R.

Las placas con las que se obtienen las juntas soldadas finales para ensayos de tracción tienen una dimensión de 230x280x4 [mm] para el acero ASTM A572 Gr. 50 y para el acero ASTM A36 y 230x280x6 [mm]. Para la obtención de probetas de impacto se usaron placas de dimensiones menores 27x81x4 [mm] para el acero ASTM A572 Gr. 50 y 27x81x6 [mm] para el acero ASTM A36.

2.1.2. Equipo utilizado

Para realizar los procesos de soldadura se utilizó, una soldadora marca “LINCOLN ELECTRIC”, figura 11-2, perteneciente a la Facultad de Mecánica- ESPOCH.



Figura 4-2. Soldadora LINCOLN ELECTRIC.

Realizado por: Medina, E; Vaca, R. 2020

Tabla 3-2: Especificaciones Técnicas de la soldadora Linconl Electric.

Corriente	AC
Artículo	Soldadora de electrodo revestido
Rango de salida (Amperes)	40-225
Ciclo de trabajo	20%
Entrada (Amperes)	50
Hz	60
Voltaje de entrada	225
Voltaje de circuito de Salida	25
Proceso de soldadura	Electrodo Revestido

Fuente: (LINCOLN ELECTRIC , 2017)

Realizado por: Medina, E; Vaca, R. 2020

2.1.3. Electrodo

Para cada proceso de soldadura, se usó electrodos E6011 de 1/8 in de diámetro marca AGA, se lo seleccionó por sus características. Es un electrodo con un alto contenido de celulosa que ayuda a

tener una buena estabilidad de arco, ductilidad superior a electrodos como el E6010. Se lo usa ampliamente en aceros al carbono. Para la selección del electrodo se debe verificar que las propiedades químicas y de resistencia a la tracción, sean similares a las del metal base.

Tabla 4-2: Comparación de propiedades de electrodo E6011 y aceros.

	Electrodo E6011	ASTM A36	ASTM A572 Gr. 50
Resistencia a la tensión [ksi]	72	80 máx.	65
Limite elástico [ksi]	63	36	50
%C	0,10	0,25	0,21

Fuente: (Universidad Autonoma Metropolitana de Mexico, 2010)

Realizado por: Medina, E; Vaca, R. 2020

Cabe recalcar que el electrodo E6011 es un tipo de electrodo que ayuda en la penetración del material de aporte, se lo emplea tanto en corriente continua como alterna; además, se lo usa para soldar en varias posiciones. El electrodo E6013 tiene similares características pero este electrodo es recomendado para soldadura de relleno.

2.1.4. Equipos para precalentamiento

Para el precalentamiento de probetas de dimensiones pequeñas, se utilizó el Horno que se encuentra en el laboratorio de fundición, de la Facultad de Mecánica- ESPOCH, en el cual se calentaron las placas a las diferentes temperaturas de precalentamiento.



Figura 5-2. Horno para calentamiento de placas.

Realizado por: Medina, E; Vaca, R. 2020

2.1.5. Instrumento de medición de temperatura.

Para la medición de temperaturas de precalentamiento adecuadas para cada proceso de soldadura se utilizaron pirómetros disponibles en el laboratorio de instrumentación y materiales de la Facultad de Mecánica (ESPOCH).



Figura 6-2. Pirómetros

Realizado por: Medina, E; Vaca, R. 2020

2.2. Temperaturas de precalentamiento

Para el cálculo de temperatura de precalentamiento se utilizará el método de Seferian, anexo H de la AWS D1.1 2015 y el método de B.W.R.A.

2.2.1. Seferian

En este método se usa una ecuación para el carbono equivalente [C], la misma que resulta de la suma de un Carbono equivalente químico [CE]_q, mismo que depende de la composición química del acero y de un Carbono equivalente del espesor [C]_e, de tal forma que se obtienen las siguientes ecuaciones. (Pástor, 2002, p.136).

$$CE_q = \%C + \% \frac{Mn+Cr}{9} + \% \frac{Ni}{18} + \% \frac{Mo}{13} \quad (1)$$

$$C_e = 0,005 * e * CE_q \quad (2)$$

$$CE = CE_q + C_e \quad (3)$$

El espesor e en mm

Finalmente para hallar la temperatura de precalentamiento se aplica la ecuación 11 desarrollada por Seferian:

$$T_p = 350 * \sqrt{CE - 0,25} \quad (4)$$

2.2.2. Método B.W.R.A

Este método nace a partir de estudio de la British Welding Research Association, la misma que establece la ecuación 5 para calcular el Carbono equivalente de un material:

$$CE = \%C + \% \frac{Mn}{20} + \% \frac{Ni}{15} + \% \frac{(Cr+Mo+V)}{10} \quad (5)$$

Mediante este método se puede relacionar varios factores que intervienen en la soldadura:

- Carbono equivalente que se calcula con la ecuación anteriormente descrita.
- El tipo de junta a realizarse y las dimensiones que se expresan en el número de severidad térmica N.S.T.
- El tipo de electrodo y el diámetro del mismo. (Pástor, 2002, p.134)

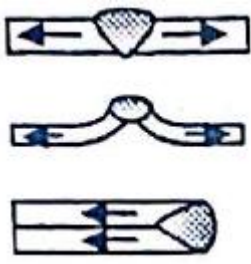
$$N.S.T = \frac{C * E}{6} \quad (6)$$

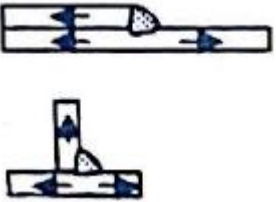
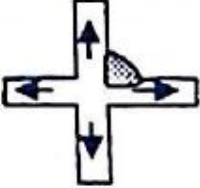
Donde:

C: Es el coeficiente de calor de dispersión térmica que se encuentra en la tabla 5-2 para algunos ejemplos comunes.

E: Espesor de la placa a soldar en mm

Tabla 5-2: Número de severidad térmica

Tipo de empalme	C	Espesor de las placas mm	NTS
	Dos caminos de dispersión de calor	6 y 6	2
		6 y 12	3
		6 y 18	4
		12 y 12	4
		24 y 24	8
24 y 28	12		

	Tres caminos de dispersión de calor	6 y 6	3
		12 y 12	6
	Cuatro caminos de dispersión de calor	24 y 24	12
		6 y 6	4
		12 y 12	8
		24 y 24	16
		6 + 12 + 12 + 12	7

Fuente: (Pástor, 2002, p.136)

En la tabla 4-1 se encuentran los índices de soldabilidad que dependen del carbono equivalente, para posteriormente encontrar en la tabla 6-2 la temperatura de precalentamiento en función del coeficiente de dispersión térmica (NST).

Tabla 6-2: Índice de soldabilidad

Carbono Equivalente		Letra que define en el índice de soldabilidad
Para soldadura con electrodo de Rutilo	Para soldadura con electrodos Básicos	
Hasta $CE = 0.2$	Hasta $CE = 0.2$	A
De 0,21 a 0,23	De 0,26 a 0,30	B
De 0,24 a 0,27	De 0,31 a 0,35	C
De 0,28 a 0,32	De 0,36 a 0,40	D
De 0,33 a 0,38	De 0,41 a 0,45	E
De 0,39 a 0,45	De 0,46 a 0,50	F
> 0,45	> 0,50	G

Fuente: (Pástor, 2002, p.135)

Tabla 7-2: Temperaturas de precalentamiento recomendadas según B.W.R.A.

Índice de severidad térmica	Índice de soldabilidad	Temperatura mínima de precalentamiento °C				
		Diámetro de electrodos en milímetros				
		3.2	4	5	6	8

NTS 2	D	0				
	E	50	0			
	F	125	25			
NTS 3	C	0				
	D	75	0			
	E	100	25	0		
	F	150	100	25		
NTS 4	C	50				
	D	100	25			
	E	125	75	0	0	
	F	175	125	75		
NTS 6	B	50				
	C	100	25			
	D	150	100	25		
	E	175	125	75	0	
	F	225	175	125	75	0
NTS 8	A	25				
	B	75	25			
	C	125	100	25		
	D	175	125	75	0	
	E	200	150	125	50	25
	F	225	200	175	125	50
NTS 12	A	75				
	B	125	25	25		
	C	150	75	75	0	
	D	200	125	125	75	0
	E	225	200	175	100	50
	F	250	225	200	150	125

NTS 16	A	75	25	0		
	B	125	75	50	0	
	C	175	150	125	50	25
	D	200	175	175	125	50
	E	225	200	200	150	100
	F	250	250	225	200	150
NTS 24	A	75	25	0		
	B	125	75	50	25	
	C	175	150	125	75	25
	D	200	175	175	125	100
	E	225	200	200	175	150
	F	250	250	225	200	200

Fuente: (Pástor, 2002, p.137)

La temperatura de precalentamiento recomendada según la norma AWS D1.1 se muestra en la tabla a continuación:

Tabla 8-2: Temperatura mínima de precalentamiento

Temperatura mínima de precalentamiento precalificado y de interpase							
C a t e g o r í a	Especificación del acero	Proceso de soldadura	Espesor de la sección más gruesa en el punto de soldadura		Temperatura mínima de precalentamiento y de interpase		
			Pulg.	mm.	°F	°C	
			A	ASTM A 36 ASTM A 53 Grado B ASTM A 106 Grado B ASTM A 131 Grado A, B, CS, D, DS, E ASTM A 139 Grado B ASTM A 381 Grado Y35 ASTM A 500 Grado A Grado B	SMAW Con electrodos diferentes a los de bajo carbono	1/8 a 3/4 Incl.	3 a 20 Incl.

		Grado C					
B	ASTM A 53	Grado B	SMAW Con otros electrodos bajos en hidrogeno SAW, GMAW, FCAW	1/8 a 3/4 Incl.	3 a 20 Incl.	32°	0°
	ASTM A 106	Grado B					
	ASTM A 131	Grado A, B CS,D, DS, E AH 32 & 36 DH 32 & 36 EH 32 & 36					
	ASTM A 139	Grado B		Más de 3/4 por 1-1/2 Incl.	Más de 20 por 38 Incl.	50	10
	ASTM A 381	Grado Y35		Más de 1-1/2 por 2-1/2 Incl.	Más de 38 por 65 Incl.	150	65
	ASTM A 441	Grado A		Más de 2-1/2	Más de 65	225	110
	ASTM A 500	Grado B Grado C					
	ASTM A 501	Grado 55 & 60 65 & 70					
	ASTM A 516	Grado I & II					
	ASTM A 524	Grado 50 & 55					
	ASTM A 529	Clases 1 & 2					
	ASTM A 537	Grado 42, 50, 55					
	ASTM A 572						

Fuente: (American Welding Society D1.1, 2010, p.71)

Como se puede observar en la norma AWS D 1.1 no se encuentran temperaturas de precalentamiento recomendadas por lo tanto se usa el anexo H de la misma norma.

2.2.3. Anexo H - AWS D1.1

Para determinar las temperaturas de precalentamiento mediante la utilización del anexo H se debe conocer que existen dos métodos diferentes: Control de Hidrógeno y control de dureza.

Adicionalmente la norma recomienda el siguiente procedimiento como guía para la selección del método.

- Determinar el carbono equivalente para localizar la posición de la zona del acero en la figura 31-1.

$$CE = C + \frac{(Mn+Si)}{6} + \frac{(Cr+Mo+V)}{5} + \frac{(Ni+Cu)}{15} \quad (7)$$

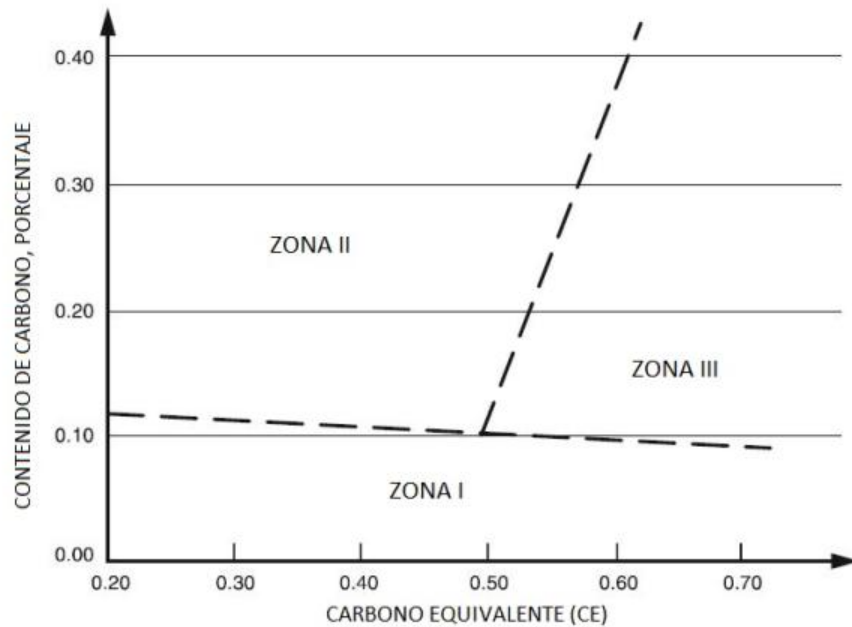


Figura 7-2. Clasificación de zonas de aceros

Fuente: (AWS D1.1 Anexo H, 2015, p.360)

b) Las características de rendimiento de cada zona y la acción recomendada son las siguientes:

Zona I: el agrietamiento tiene una probabilidad baja, pero puede ocurrir con alto contenido de hidrógeno o alta restricción. Se recomienda el uso del método de control de hidrógeno para hallar la temperatura de precalentamiento. (AWS D1.1 Anexo H, 2015)

Zona II: el método de control de la dureza se usa para determinar la entrada de energía mínima para soldaduras de filete de paso simple sin precalentamiento. En el aporte de energía no se recomienda el uso de este método, para el aporte de energía se debe determinar el precalentamiento por el método de hidrógeno. Para los aceros con alto contenido de carbono, se puede requerir una energía mínima para controlar la dureza y el precalentamiento. (AWS D1.1 Anexo H, 2015)

Zona III: si el acero pertenece a esta zona se debe usar el método de control de hidrógeno. Cuando la entrada de calor esté controlada para conservar las propiedades de la zona afectada por el calor (ZAC), esto sucede en ciertos aceros templados y revenidos. (AWS D1.1 Anexo H, 2015)

Método de dureza

1. Calcular el carbono equivalente con la ecuación (8)

El análisis químico se puede obtener de:

- i. Certificado de prueba de fábrica.
 - ii. Química de producción típica.
 - iii. Especificación química.
 - iv. Prueba de usuario. (AWS D1.1 Anexo H, 2015)
2. La velocidad crítica de enfriamiento se determina para una dureza máxima en la ZAC de 350 HV O 400 HV de la figura 32-1. (AWS D1.1 Anexo H, 2015)

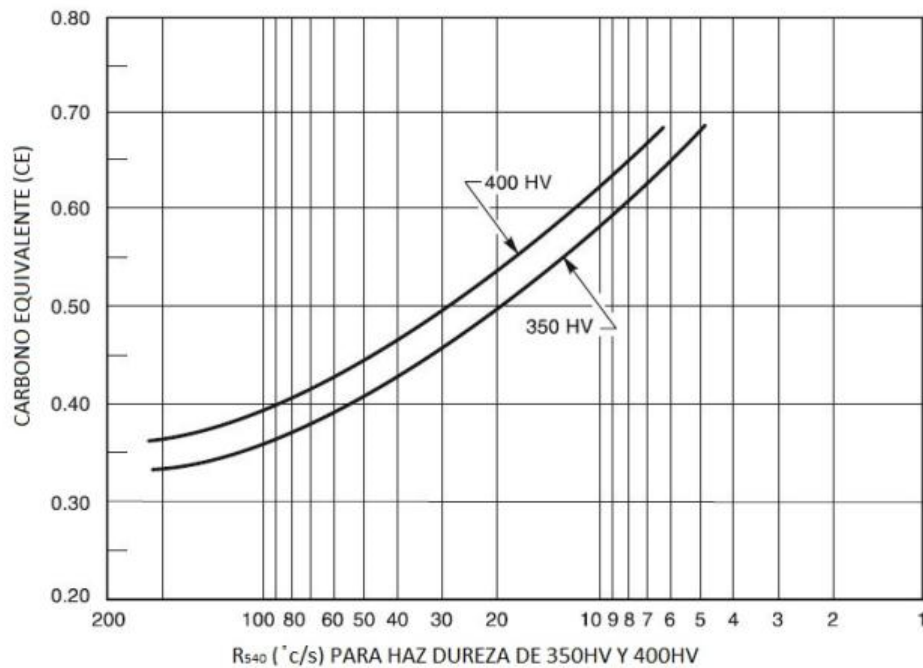


Figura 8-2. Tasa de enfriamiento crítico para 350 HV Y 400 HV

Fuente: (AWS D1.1 Anexo H, 2015, p.360)

3. Utilizando los espesores aplicables para el alma y ala del perfil, se debe seleccionar el diagrama apropiado de la figura 32-1, además se debe determinar la entrada de energía mínima para soldaduras de filete de un solo paso. Esta energía se aplica para soldaduras realizadas por proceso SAW. (AWS D1.1 Anexo H, 2015)
4. Para otros procesos de soldadura, la entrada de energía mínima de un solo paso se puede hallar mediante los factores de multiplicación de energía estimada para el proceso SAW. (AWS D1.1 Anexo H, 2015)

Tabla 9-2: Factores de multiplicación para procesos de soldadura

Proceso de Soldadura	Factor de multiplicación
SAW	1
SMAW	1,5
GMAW, FCAW	1.25

Fuente: (AWS D1.1 Anexo H, 2015, p.357)

Las figuras presentadas a continuación sirven para determinar la velocidad de enfriamiento para soldaduras de filetes SAW de un solo paso.

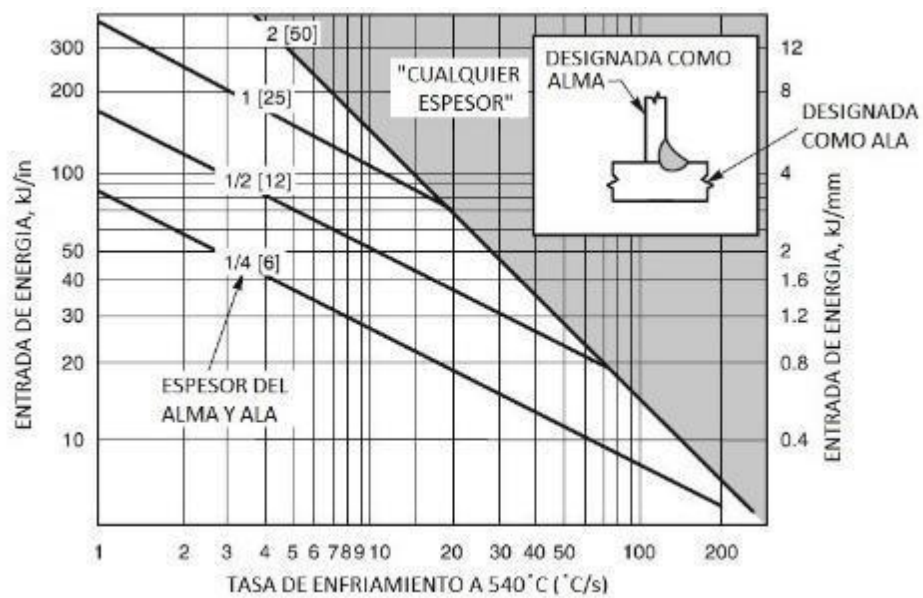


Figura 9-2. Soldaduras de filete de una sola pasada con alma y ala del mismo espesor.

Fuente: (AWS D1.1 Anexo H, 2015, p.361)

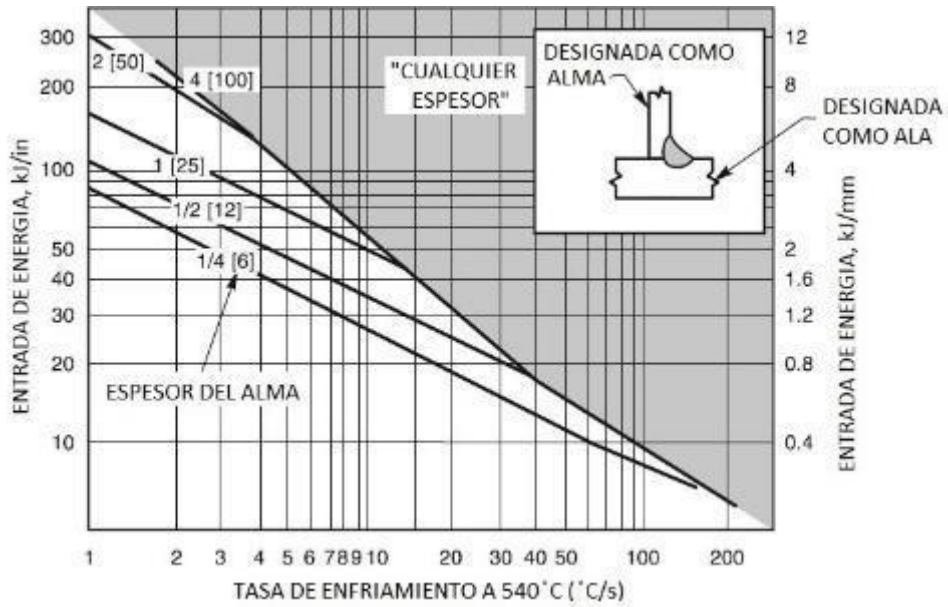


Figura 10-2. Soldaduras de filete de una sola pasada con ala de 1/4 in (6mm) y alma de espesor variable.

Fuente: (AWS D1.1 Anexo H, 2015, p.361)

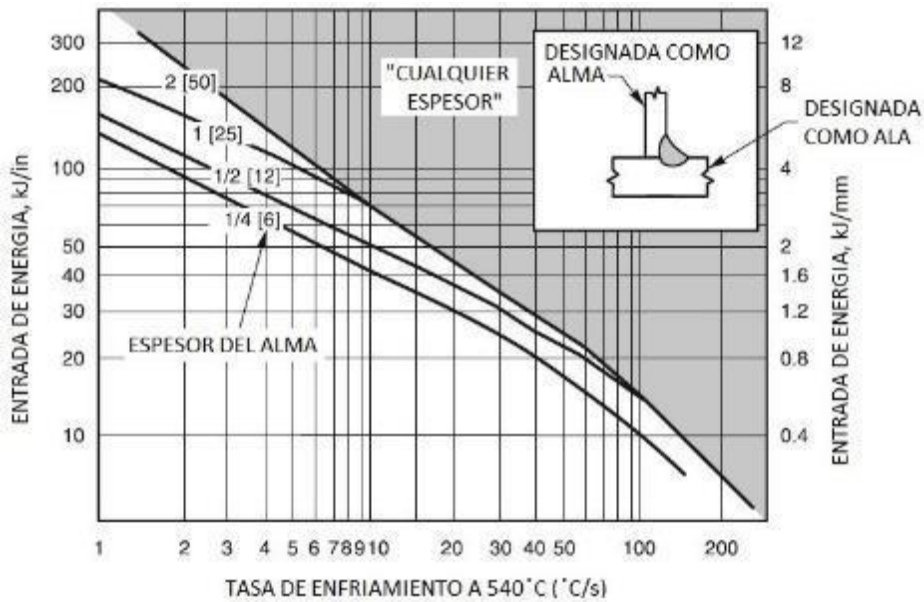


Figura 11-2. Soldaduras de filete de una sola pasada con ala de 1/2 in (12mm) y alma de espesor variable.

Fuente: (AWS D1.1 Anexo H, 2015, p.362)

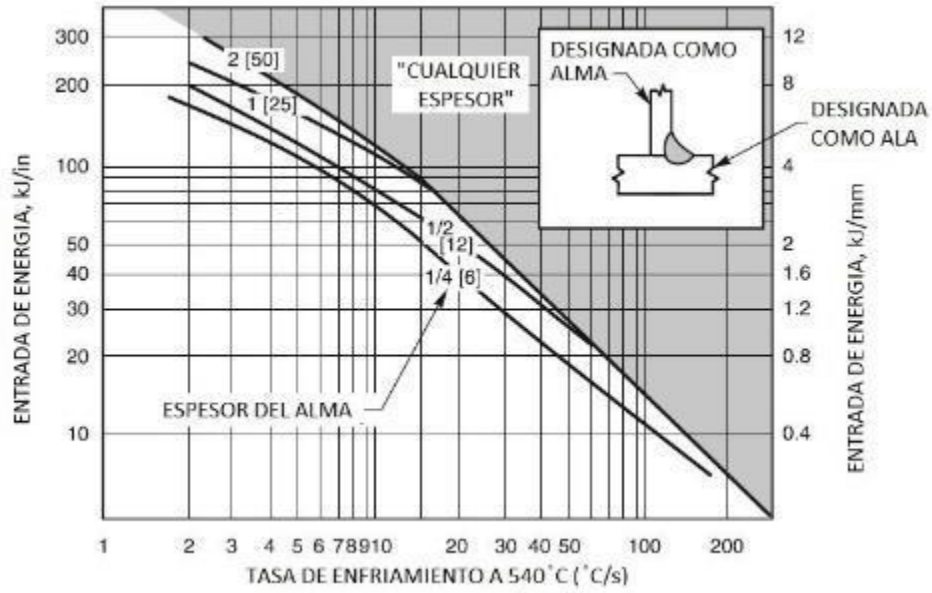


Figura 12-2. Soldaduras de filete de una sola pasada con ala de 1 in (25mm) y alma de espesor variable.

Fuente: (AWS D1.1 Anexo H, 2015, p.362)

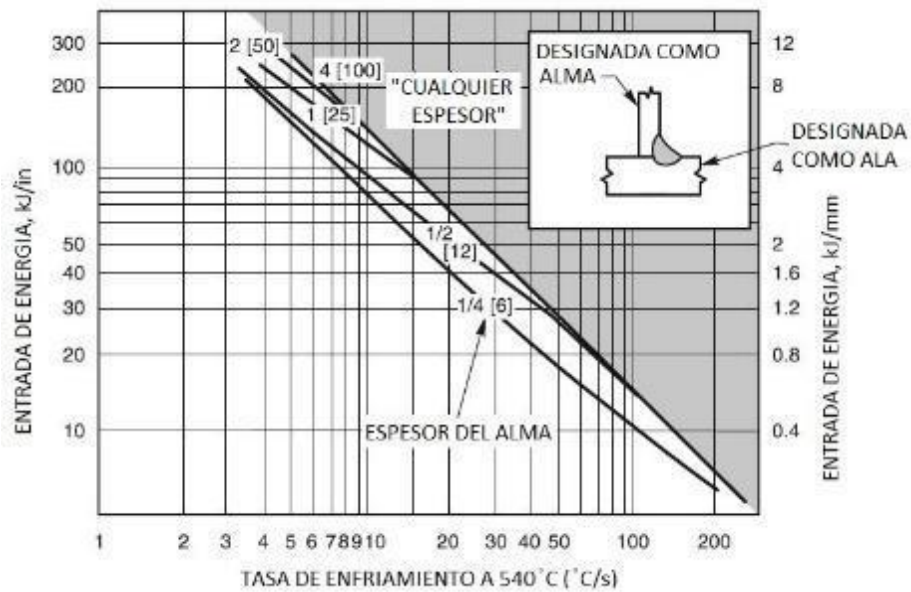


Figura 13-2. Soldaduras de filete de una sola pasada con ala de 2 in (50mm) y alma de espesor variable.

Fuente: (AWS D1.1 Anexo H, 2015, p.363)

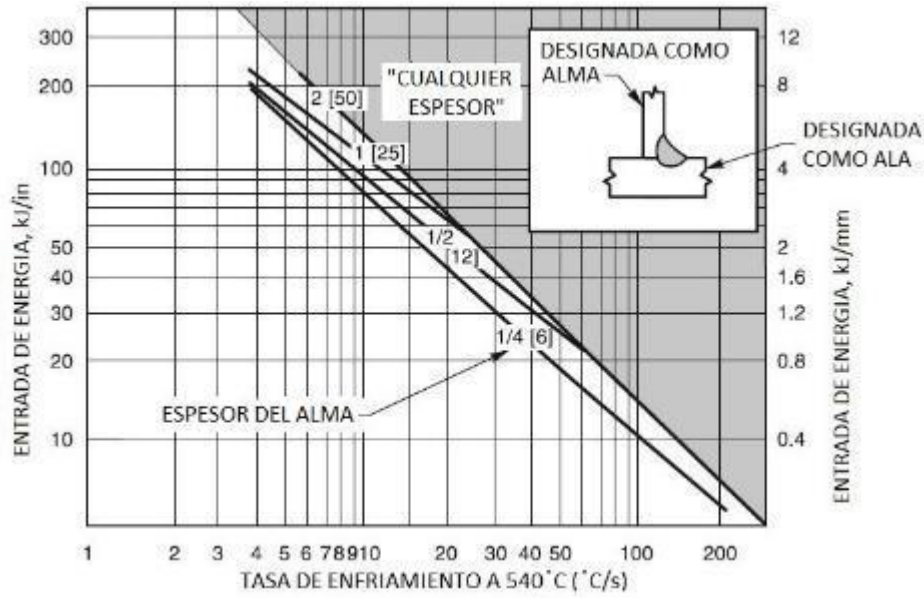


Figura 14-2. Soldaduras de filete de una sola pasada con ala de 4 in (100 mm) y alma de espesor variable.

Fuente: (AWS D1.1 Anexo H, 2015, p.363)

Método de control de Hidrógeno:

- 1) Calcular el valor de P_{cm} empleando la ecuación 15.

$$P_{cm} = C + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (15)$$

- 2) El nivel de hidrógeno se definirá de la siguiente manera:

2.1 H1 Hidrógeno extra bajo

Los electrodos dan un contenido de hidrógeno difusible de menos de 5 ml / 100 g de metal depositado cuando el contenido de humedad del electrodo es el 0,2% máximo según la AWS A5.1 o 5.5. Esto puede establecerse mediante la realización de un test después de la extracción del envase y hasta el uso del mismo, siempre teniendo en cuenta las condiciones reales de almacenamiento antes del uso inmediato. (AWS D1.1 Anexo H, 2015) Se puede suponer que lo siguiente cumple con este requisito:

- a) Electrodo con bajo contenido de hidrógeno tomados de recipientes herméticamente sellados, secados a 700 °F -800 °F durante una hora y utilizados dentro de las dos horas posteriores a la extracción. (AWS D1.1 Anexo H, 2015)
- b) Proceso GMAW con alambre sólido limpio. (AWS D1.1 Anexo H, 2015)

2.2 H2 Bajo contenido de hidrógeno

Los electrodos dan un contenido de hidrógeno difusible de menos de 10 ml / 100 g de metal depositado cuando el contenido de humedad del electrodo de 0,4% máximo de acuerdo con la norma AWS A5.1. Esto puede establecerse al realizar un test, marca de consumibles o combinación de alambre / flujo utilizada. (AWS D1.1 Anexo H, 2015).

- a) Electrodos con bajo contenido de hidrógeno tomados de recipientes herméticamente sellados acondicionados de conformidad con el apartado 5.3.2.1 de la AWS A5.1 y utilizados dentro de pocas horas posteriores a la extracción.
- b) Proceso SAW con flujo seco. (AWS D1.1 Anexo H, 2015)

2.3 H3 Hidrógeno no controlado

Otro tipo de electrodos que no cumplan con los requisitos de H1 y H2. (AWS D1.1 Anexo H, 2015)

- 3) Los índices de susceptibilidad P_{cm} están agrupados en la tabla a continuación:

Tabla 10-2: Índice de susceptibilidad

Agrupación del Índice de Susceptibilidad en Función del Nivel de Hidrógeno “H” y el Parámetro de Composición P_{cm}					
NIVEL DE HIDROGENO	Agrupación del Índice de Susceptibilidad				
H	Carbono Equivalente = P_{cm}^a				
	< 0.18	< 0.23	< 0.28	< 0.33	< 0.38
H1	A	B	C	D	E
H2	B	C	D	E	F
H3	C	D	E	F	G

Fuente: (AWS D1.1 Anexo H, 2015, p.358)

- 4) Temperatura mínima de precalentamiento: en la tabla 8-1 se observan las temperaturas mínimas de precalentamiento dependiendo del nivel de restricción y el índice de susceptibilidad térmica. (AWS D1.1 Anexo H, 2015).
- 5) Los niveles de restricción deben ser determinados mediante la experiencia, criterio de ingeniería y mediante la investigación. (AWS D1.1 Anexo H, 2015)

- a) Restricción Baja: para este nivel de restricción las juntas soldadas de filete y ranura poseen una tolerancia de movimiento razonable de sus elementos.
- b) Restricción Media: en este nivel la libertad de movimiento de los elementos es muy reducida, ya que se encuentran unidos a un medio estructural.
- c) Restricción Alta: describe a las juntas soldadas que no poseen libertad de movimiento para miembros soldados, por ejemplo en materiales de espesor alto. (AWS D1.1 Anexo H, 2015).

Tabla 11-2: Temperatura de Pre calentamiento mínimo

Pre calentamiento Mínimo y Temperatura de Interpase para Tres Niveles de Restricción								
Nivel de Restricción	Espesor mm	Pre calentamiento Mínimo y Temperatura de Interpase (°C)						
		Agrupación del Índice de Susceptibilidad						
		A	B	C	D	E	F	G
Bajo	< 10	< 20	< 20	< 20	< 20	60	140	150
	10-20 incl.	< 20	< 20	20	60	100	140	150
	> 20-38 incl.	< 20	< 20	20	80	110	140	150
	> 38-75 incl.	20	20	40	95	120	140	150
	> 75	20	20	40	95	120	140	150
Medio	< 10	< 20	< 20	< 20	< 20	70	140	160
	10-20 incl.	< 20	< 20	20	80	115	145	160
	> 20-38 incl.	20	20	75	110	140	150	160
	> 38-75 incl.	20	80	110	130	150	150	160
	> 75	95	120	140	150	160	160	160
Alto	< 10	< 20	< 20	20	40	110	150	160
	10-20 incl.	< 20	20	65	105	140	160	160
	> 20-38 incl.	20	85	115	140	150	160	160
	> 38-75 incl.	115	130	150	150	160	160	160
	> 75	115	130	150	150	160	160	160

Fuente: (AWS D1.1 Anexo H, 2015 p.359)

2.3. Cálculo de tiempo de permanencia en el horno

Para realizar el cálculo del tiempo de precalentamiento en el horno para cada placa, se debe tomar en cuenta que sobre las mismas incide: una convección natural y una conducción de calor en régimen transitorio, además de calor por radiación pero que para el análisis no se lo toma en cuenta, debido a que el calor generado es relativamente pequeño y el horno se considera como un espacio cerrado con un ambiente convectivo de acuerdo a la temperatura requerida para el procedimiento. El cálculo se realizó mediante las siguientes ecuaciones y propiedades térmicas de cada tipo de acero.

$$T_f = \frac{T_\infty + T_{so}}{2} \quad (8)$$

T_f : Temperatura fílmica.

T_∞ : Temperatura del ambiente convectivo.

T_{so} : Temperatura inicial en la superficie.

$$L_c = \frac{A_s}{P} \quad (9)$$

L_c : Longitud característica.

A_s : Área superficial mayor de la placa.

P : Perímetro de la placa.

$$\beta = \frac{1}{T_f} \quad (10)$$

β : Coeficiente de expansión volumétrica.

$$Ra_L = \frac{g * \beta * (T_\infty - T_{so}) * L_c^3}{\gamma^2} * Pr \quad (11)$$

Ra_L : Numero de Rayleigh.

g : Gravedad.

γ : Viscosidad cinemática.

$$Nu = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 * Ra_L^{1/6}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (12)$$

Nu : Número de Nusselt.

Pr : Número de Prandtl.

$$h_{\infty} = \frac{k}{L_c} * Nu \quad (13)$$

h_{∞} : Coeficiente de convección.

k : Conductividad térmica del acero.

$$\frac{T_{sf} - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = e^{-bt} \quad (14)$$

T_{sf} : Temperatura final en la superficie.

T_i : Temperatura en el centro de la placa.

t : Tiempo.

$$b = \frac{h_{\infty} * A_s}{\rho * C_p * \forall} \quad (15)$$

ρ : Densidad.

C_p : Calor específico del acero.

\forall : Volumen de la placa.

Tabla 12-2: Propiedades de acero ASTM A36.

ACERO ASTM A36		
Propiedad	Valor	Unidades
Densidad	7854	kg/m ³
Conductividad térmica	60,5	W/m. K
Calor específico	434	J/kg. K
Emisividad	0,26	-
Difusividad térmica	17,7 x 10 ⁻⁶	m ² /s

Fuente: (Yanus A. Cengel, 2007, p. 884)

Realizado por: Medina, E; Vaca, R. 2020

Tabla 13-2: Propiedades de acero ASTM A572 Gr.50

Acero ASTM A572		
Propiedad	Valor	Unidades
Densidad	8131	kg/m ³
Conductividad térmica	41	W/m. K
Calor específico	434	J/kg. K
Emisividad	0,26	-
Difusividad térmica	11,6 x 10 ⁻⁶	m ² /s

Fuente: (Yanus A. Cengel, 2007, p. 884)

Realizado por: Medina, E; Vaca, R. 2020

Tabla 14-2: Propiedades del aire a 1atm

Propiedades del aire a la presión de 1atm			
Temp. T, °C	Conductividad térmica K, W/m. K	Viscosidad cinemática γ , m ² /s	Numero de Prandtl Pr
80	0,02953	2,097 * 10 ⁻⁵	0,7154
90	0,03024	2,201 * 10 ⁻⁵	0,7132
100	0,03095	2,306 * 10 ⁻⁵	0,7111
120	0,03235	2,522 * 10 ⁻⁵	0,7073
140	0,03374	2,745 * 10 ⁻⁵	0,7041
160	0,03511	2,975 * 10 ⁻⁵	0,7014
180	0,03646	3,212 * 10 ⁻⁵	0,6992
200	0,03779	3,455 * 10 ⁻⁵	0,6974
250	0,04104	4,091 * 10 ⁻⁵	0,6946
300	0,04418	4,765 * 10 ⁻⁵	0,6935
350	0,04721	5,475 * 10 ⁻⁵	0,6937

Fuente: (Yanus A. Cengel, 2007, p. 860,)

Realizado por: Medina, E; Vaca, R. 2020

Pre calentamiento de la placa de acero A36 de 6 mm a 115°C:

Para ingresar las placas al horno se lo debió calentar a una temperatura de 200°C, para poder garantizar que las mismas superen la temperatura deseada y al momento de retirarlas para realizar el proceso de soldadura se pueda asegurar que tengan 115°C al medir con el pirómetro, esto

debido a que existe una variación de temperatura en el proceso de retirar y ubicar para soldar, por el efecto del ambiente convectivo en el cuarto de soldeo.

$$T_{\infty} = 150 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{so} = 18 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$A_s = 2,27 * 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V = 1,36 * 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$L = 0,028 \text{ m}$$

$$T_f = \frac{T_{\infty} + T_{so}}{2}$$

$$T_f = \frac{200 \text{ }^{\circ}\text{C} + 18 \text{ }^{\circ}\text{C}}{2}$$

$$T_f = 109 \text{ }^{\circ}\text{C} + 273$$

$$T_f = 382 \text{ K}$$

$$L_c = L$$

$$L = 0,028 \text{ m}$$

$$\beta = \frac{1}{T_f}$$

$$\beta = \frac{1}{357 \text{ K}}$$

$$\beta = 0,0026$$

Para realizar el cálculo del número de Rayleigh se debe obtener las propiedades del aire, realizando interpolaciones en tabla 9-2 de acuerdo a la temperatura fílmica calculada, que para este caso es de 84 °C, con lo que obtenemos:

$$\gamma = 2,403 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Pr = 0,70939$$

$$K = 0,03158 \text{ W/ m} \cdot \text{K}$$

$$Ra_L = \frac{g * \beta * (T_{\infty} - T_{so}) * L_c^3 * Pr}{\gamma^2} \quad (16)$$

$$Ra_L = \frac{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * \frac{1}{357 \text{ K}} * (200 \text{ }^{\circ}\text{C} - 18 \text{ }^{\circ}\text{C}) * (0,028 \text{ m})^3 * 0,70939}{(2,403 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})^2}$$

$$Ra_L = 1,26045 * 10^5$$

Por medio del anexo A. Correlaciones empíricas del número promedio de Nusselt para la convección natural sobre superficies tabla 9-1 de Cengel, (Yanus A. Cengel, 2007, p. 511). Utilizando la ecuación 9-21 del anexo A para obtener mayor exactitud en los cálculos del número de Nusselt, tratándola como placa vertical tenemos:

$$Nu = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 * Ra_L^{1/6}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$$

$$Nu = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 * (1,26045 * 10^5)^{1/6}}{[1 + (0,492/0,70939)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$$

$$Nu = 9,75$$

$$h_\infty = \frac{k}{L_c} * Nu$$

$$h_\infty = \frac{0,03158 \text{ W/ m . K}}{0,0432 \text{ m}} * 9,75$$

$$h_\infty = 10,9934 \text{ W/ m}^2 \cdot \text{K}$$

$$b = \frac{h_\infty * A_s}{\rho * C_p * V}$$

$$b = \frac{(10,9934 \text{ W/ m}^2 \cdot \text{K}) * (2,27 * 10^{-3}) \text{ m}^2}{(7854 \text{ kg/m}^3) * (434 \text{ J/kg.K}) * (2,1 * 10^{-4} \text{ m}^3)}$$

$$b = 5,375 * 10^{-4} \text{ s}^{-1}$$

$$\frac{T_{sf} - T_\infty}{T_i - T_\infty} = e^{-bt}$$

$$\frac{140 \text{ }^\circ\text{C} - 200 \text{ }^\circ\text{C}}{115 \text{ }^\circ\text{C} - 200 \text{ }^\circ\text{C}} = e^{5,375 * 10^{-4} \text{ s}^{-1} * t}$$

$$t = 647,983 \text{ s} = 10,8 \text{ min}$$

En base a los cálculos realizados se puede determinar los tiempos de precalentamiento a las distintas temperaturas requeridas para cada placa las cuales se presentan resumidas en las siguientes tablas.

Tabla 15-2: Tiempos de precalentamiento en el horno para el acero ASTM A36.

Cálculo del tiempo de precalentamiento para placas de acero ASTM A36 de 6 mm									
T_i	T_∞	T_f	$L_c = L$	β	Ra_L	Nu	h_∞	b	t
°C	°C	°C	m	K^{-1}	–	–	$\frac{W}{m^2K}$	s^{-1}	min
115	200	109	0,028	0,0026	126045,88	9,747	10,993	0,00054	10,8
300	400	209	0,028	0,0021	93349,64	9,042	12,392	0,00061	14,1
500	600	309	0,028	0,0017	62387,44	8,205	13,107	0,00064	13,3

Realizado por: Medina, E; Vaca, R. 2020

Tabla 16-2: Tiempos de precalentamiento en el horno para el acero ASTM A572 Gr.50

Cálculo del tiempo de precalentamiento para placas de acero ASTM A572 de 4 mm									
T_i	T_∞	T_f	$L_c = L$	β	Ra_L	Nu	h_∞	b	t
°C	°C	°C	m	K^{-1}	–	–	$\frac{W}{m^2K}$	s^{-1}	min
115	200	109	0,028	0,0026	126045,88	9,747	10,993	0,00078	7,5
300	400	209	0,028	0,0021	93349,64	9,042	12,392	0,00088	9,7
500	600	309	0,028	0,0017	62387,44	8,205	13,107	0,00093	9,2

Realizado por: Medina, E; Vaca, R. 2020

Una vez determinados por medio de transferencia de calor los tiempos de precalentamiento exactos, para garantizar que las placas tengan una temperatura homogénea en todo su volumen, se comprueba con los tiempos recomendados en el Protocolo de Tratamientos Térmicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería, el mismo que sugiere una permanencia de 2 minutos en el horno por cada milímetro de espesor. (Garavito, 2008). Se puede concluir que los tiempos calculados son muy similares a los recomendados, por lo que para garantizar el procedimiento de precalentamiento y que la temperatura sea la necesaria en el centro de la placa se mantiene dentro del horno un aproximado de 2 minutos como mínimo, por cada milímetro de espesor tomando en cuenta también los tiempos calculados.

Este procedimiento de precalentamiento en el horno se lo realizo únicamente para las placas de donde se obtendrían las probetas para los ensayos de impacto, ya que las placas utilizadas para la obtención de las probetas para los ensayos de tracción, el precalentamiento se lo realizo por medio

de una antorcha donde se garantizó que la temperatura sea la adecuada, al realizar mediciones continuas sobre la superficie de la placa por medio de un pirómetro y una vez alcanzada esta temperatura, se mantuvo la llama sobre las placas durante el tiempo estimado en los cálculos, para lograr así que la temperatura sea homogénea en toda la junta, antes de proceder a realizar la soldadura por arco, esto debido a que por la geometría de las placas que excedían a las dimensiones del horno no se las podía ingresar al mismo.

2.4. Procedimiento de soldadura

Con las nuevas temperaturas establecidas y su cálculo de tiempo de permanencia en el horno se procede a la elaboración de los cupones de soldadura. En la figura 14-2 se detalla el procedimiento.



Figura 15-2. Procedimiento para la obtención de cupones de soldadura.

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

2.5. Parámetros de proceso de soldadura

Es importante conocer los parámetros de soldadura, se conoce que los equipos de soldadura SMAW trabajan a una corriente constante, en la soldadora empleada para la realización de placas

soldadas se regula el amperaje con el que se va a soldar y este permanece constante durante el proceso. Siendo el amperaje constante cuando se genera el arco eléctrico en el electrodo, el voltaje de circuito abierto sufre una caída desde el voltaje de abierto (VCA) hasta el voltaje de arco (VA).

En la tabla 17-2 se detallan los parámetros utilizados para la soldadura de placas de acero ASTM A572 Gr.50 y en la tabla 17-2 se muestran los parámetros para juntas soldadas de acero ASTM A36.

Tabla 17-2. Parámetros de soldadura Acero ASTM A572 Gr.50

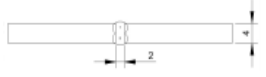
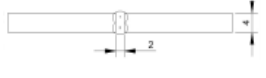
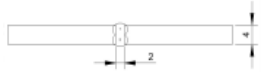
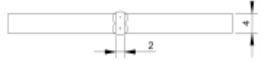
SIN PRECALENTAMIENTO								
Pase	Proceso	Metales de aporte	Diam.	Corriente		Voltaje [V]	Velocidad de avance [mm/s]	Detalle de Junta
		Clase	mm	Tipo y Polaridad	Amperaje o alambre de alimentación			
1	SMAW	E6011	3.2	AC	--	25	3,1	
2	SMAW	E6011	3.2	AC	--	25	3,1	
Temperatura de Pre calentamiento 115°C								
Pase	Proceso	Metales de aporte	Diam.	Corriente		Voltaje [V]	Velocidad de avance [mm/s]	Detalle de Junta
		Clase	mm	Tipo y Polaridad	Amperaje o alambre de alimentación			
1	SMAW	E6011	3.2	AC	--	25	3,4	
2	SMAW	E6011	3.2	AC	--	25	3,4	
Temperatura de Pre calentamiento 300°C								
Pase	Proceso	Metales de aporte	Diam.	Corriente		Voltaje [V]	Velocidad de avance [mm/s]	Detalle de Junta
		Clase	mm	Tipo y Polaridad	Amperaje o alambre de alimentación			
1	SMAW	E6011	3.2	AC	--	25	3,6	
2	SMAW	E6011	3.2	AC	--	25	3,6	
Temperatura de Pre calentamiento 500°C								
Pase	Proceso	Metales de aporte	Diam.	Corriente		Voltaje [V]	Velocidad de avance [mm/s]	Detalle de Junta
		Clase	mm	Tipo y Polaridad	Amperaje o alambre de alimentación			
1	SMAW	E6011	3.2	AC	--	25	3,9	
2	SMAW	E6011	3.2	AC	--	25	3,9	

Tabla 18-2. Parámetros de soldadura Acero ASTM A36

Sin precalentamiento								
Pase	Proceso	Metales de aporte	Diam.	Corriente		Voltaje [V]	Velocidad de avance [mm/s]	Detalle de Junta
		Clase	mm	Tipo y Polaridad	Amperaje o alambre de alimentación			
1	SMAW	E6011	3.2	AC	--	25	3,2	
2	SMAW	E6011	3.2	AC	--	25	3,2	
3	SMAW	E6011	3.2	AC	--	25	3,2	
4	SMAW	E6011	3.2	AC	--	25	3,2	
Temperatura de Precalentamiento 115°C								
Pase	Proceso	Metales de aporte	Diam.	Corriente		Voltaje [V]	Velocidad de avance [mm/s]	Detalle de Junta
		Clase	mm	Tipo y Polaridad	Amperaje o alambre de alimentación			
1	SMAW	E6011	3.2	AC	--	25	3,5	
2	SMAW	E6011	3.2	AC	--	25	3,5	
3	SMAW	E6011	3.2	AC	--	25	3,5	
4	SMAW	E6011	3.2	AC	--	25	3,5	
Temperatura de Precalentamiento 300°C								
Pase	Proceso	Metales de aporte	Diam.	Corriente		Voltaje [V]	Velocidad de avance [mm/s]	Detalle de Junta
		Clase	mm	Tipo y Polaridad	Amperaje o alambre de alimentación			
1	SMAW	E6011	3.2	AC	--	25	3,7	
2	SMAW	E6011	3.2	AC	--	25	3,7	
3	SMAW	E6011	3.2	AC	--	25	3,7	
4	SMAW	E6011	3.2	AC	--	25	3,7	
Temperatura de Precalentamiento 500°C								
Pase	Proceso	Metales de aporte	Diam.	Corriente		Voltaje [V]	Velocidad de avance [mm/s]	Detalle de Junta
		Clase	mm	Tipo y Polaridad	Amperaje o alambre de alimentación			
1	SMAW	E6011	3.2	AC	--	25	3,7	
2	SMAW	E6011	3.2	AC	--	25	3,7	
3	SMAW	E6011	3.2	AC	--	25	3,7	
4	SMAW	E6011	3.2	AC	--	25	3,7	

Realizado por: Medina, E; Vaca, R. 2020

2.6. Velocidades de enfriamiento en juntas soldadas

La velocidad de enfriamiento se puede calcular mediante la ecuación 17:

$$S = 2\pi k \rho C_p \left(\frac{e}{H_n}\right)^2 (T_i - T_0)^3 \quad (17)$$

Donde:

T_i : temperatura de interés

e : espesor de la placa

T_0 : temperatura ambiente.

K : conductividad térmica

ρ : densidad

C_p : calor específico

H_n : calor neto absorbido en la soldadura.

En el caso de placas gruesas o que requieren más de cuatro pasadas para una penetración total se puede usar la ecuación (2) (Pástor, 2002, p. 73).

$$S = \frac{2\pi K(T_i - T_0)}{H_n} \quad (18)$$

Las ecuaciones 17 y 18, son aplicables únicamente cuando la conducción de calor es bidimensional. (Pástor, 2002, p. 72).

Para conocer si se trata de una placa fina o gruesa se utiliza la ecuación (19), misma que define el criterio de espesor relativo τ . (Pástor, 2002, p. 73).

$$\tau = e \left(\frac{\rho C_p (T_i - T_0)}{H_n} \right)^{1/2} \quad (19)$$

Si $\tau < 0,75$ se aplica el criterio de placa fina y por el contrario si $\tau \geq 0,75$, la velocidad de enfriamiento se calcula mediante el criterio de placa gruesa.

2.7. Ciclo térmico de juntas soldadas

El flujo de calor q/v se puede calcular con la ecuación 4.

$$q/v = nVI \quad (20)$$

Donde:

n : eficiencia del arco, depende del proceso de soldadura. Ver tabla 19-2.

V : voltaje

I : corriente

v : velocidad de avance

Tabla 19-2: Eficiencia del Arco

Proceso	n
SMAW	0,7 – 0,85
GTAW (argón)	0,22- 0,48
GMAW (argón)	0,66- 0,75
SAW	0,9- 0,99

Fuente: (Pástor, 2002)

Mediante mediciones experimentales realizadas del ciclo térmico de la soldadura, han mostrado que, para un determinado proceso de soldadura, geometría y proceso, el tiempo de enfriamiento entre el rango de 800°C y 500°C es constante, al menos para el metal base afectado por el calor (ZAC). La temperatura de 800 °C es importante porque representa la temperatura de transformación A_3 de una gran cantidad de aceros. (Pástor, 2002, p. 84).

Para el cálculo de la temperatura T_p se emplea la ecuación 21, si es una placa gruesa.

$$T_p = T_0 + \frac{q}{v} \frac{1}{2\pi * k * t} \exp\left(-\frac{r^2}{4at}\right) \quad (21)$$

Mientras que para placas delgadas se usa la ecuación 22.

$$T_p = T_0 + \frac{q}{v} \frac{1}{d * (4\pi * k * \rho * c_p * t)^{1/2}} \exp\left(-\frac{r^2}{4at}\right) \quad (22)$$

Donde:

T_p : temperatura pico del ciclo térmico

r : distancia desde la fuente de calor

exp : base de los logaritmos naturales ($e=2,718281\dots$)

Para determinar si una placa es fina o gruesa no es suficiente con conocer su espesor, si no también es necesario conocer el proceso de soldadura y el tipo del material. Para ello se debe calcular el espesor crítico mediante la siguiente ecuación, este es un parámetro de referencia para determinar el tipo de placa, si el espesor de la placa d es mayor que d' se trata de una placa gruesa, caso contrario se trata de una placa fina. (Pástor, 2002, p. 85).

$$d' = \left\{ \frac{q}{2 \rho c_p v} * \left(\frac{1}{773 - T_0} + \frac{1}{1073 - T_0} \right) \right\}^{1/2} \quad (23)$$

$d > d' \rightarrow$ placa gruesa

$d < d' \rightarrow$ placa delgada

También se debe tomar en cuenta, que si se aplica un precalentamiento a la soldadura, las ecuaciones antes descritas predicen unicamente un aumento numérico del valor de las isoterms, pero no cambian en forma ni rango. (Pástor, 2002, p. 87).

Durante la soldadura el enfriamiento del metal está muy lejos del equilibrio y por lo tanto, se producen estructuras no deseadas en comparación con las que se producirán con un enfriamiento lento. Si se conoce la velocidad de enfriamiento, la microestructura final obtenida puede ser estudiada mediante un diagrama de transformación de enfriamiento continuo (CCT), que corresponda al acero. Los diagramas CCT empleados para el estudio de soldadura se construyen a temperaturas de austenización mucho más elevadas, usualmente entre 1350°C y 1400°C. La otra curva necesaria para realizar este estudio es la correspondiente al diagrama CCT, para temperaturas de austenización en el rango de $A_{C1} - A_{C3}$. Si se combinan estas curvas con las obtenidas mediante el cálculo del ciclo térmico se pueden predecir las microestructuras resultantes en las diferentes zonas de la Zona afectada térmicamente. (Pástor, 2002, p. 89).

2.8. Metodología para la realización de ensayo de tintas penetrantes

Previo a la realización de ensayos mecánicos y microestructurales se procede inicialmente a la realización de ensayos no destructivos (END) con el fin de garantizar la calidad de la soldadura realizada. Se emplea la norma AWS B1.10M/B1.10:2016 Guide for the Nondestructive Examination of Welds. La misma trata sobre todos los ensayos no destructivos (END) para detectar y localizar discontinuidades superficiales en juntas soldadas.

Mediante el ensayo de tintas penetrantes, se aplica tintas visibles y fluorescentes que permiten observar poros, grietas o algún tipo de discontinuidad superficial en la junta. El método emplea un tinte líquido penetrante que se aplica a la superficie adecuadamente limpia. Después de un tiempo de permanencia adecuado, el exceso de penetrante se retira cuidadosamente de la superficie y la parte se seca. Luego se aplica un revelador que actúa como un secante, extrayendo el penetrante de la discontinuidad. (AWS B1.10M/B1.10:2016, 2016, p. 16). El tiempo recomendado tanto en la norma como en las instrucciones del kit de tintas es de 5 a 10 minutos posterior a la aplicación de cada aerosol. El penetrante, extraído de una abertura en la superficie, indica la presencia y ubicación de una discontinuidad superficial. Los cuatro pasos básicos se ilustran en la Figura 16-2.

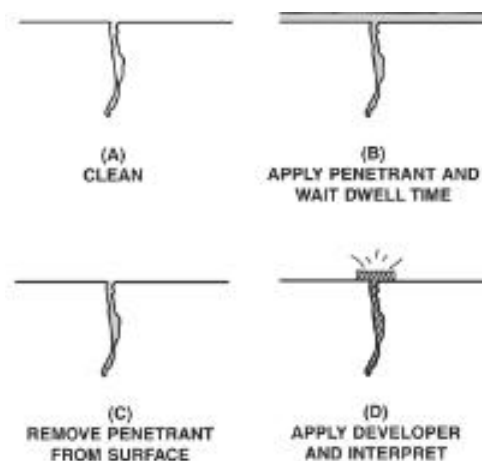


Figura 16-2. Pasos para la aplicación de PT

Fuente: (AWS B1.10M/B1.10:2016, 2016, p. 18)

Para realizar la inspección mediante PT se siguió el procedimiento mostrado en la figura 18-2.



Figura 17-2. Kit de tintas penetrantes.

Realizado por: Medina, E., Vaca, R.



Figura 18-2. Proceso para la aplicación de tintas penetrantes

Realizado por: Medina, E., Vaca, R

Con los END realizados se pretende garantizar los diferentes ensayos mecánicos y microestructurales a realizarse.

2.9. Metodología para ensayos metalográficos y medición de microdurezas

Para observar las fases que se encuentran en las diferentes zonas de soldadura se realiza el análisis metalográfico usando la norma ASTM-E3-11, la misma que indica la preparación de las muestras para su análisis metalográfico.

2.9.1. Procedimiento para la obtención de metalografías

1. Dimensión de las probetas

Con el fin de facilitar la manipulación al momento de preparar las muestras, la norma recomienda que la dimensión de las mismas esté entre el rango de 12 mm^2 a 25 mm^2 (ASTM E 3-11, 2017, p. 2). En la investigación al tratarse de juntas soldadas, en la muestra se deben identificar el metal base, ZAC y cordón de soldadura.

2. Corte

El corte se realizó mediante un corte abrasivo con disco de óxido de aluminio, el mismo que recomienda la norma para materiales ferrosos. Se debe garantizar que en el corte de las muestras no se alteren las propiedades del material de estudio.

3. Desbaste

En el proceso de desbaste se aplica un desbaste grueso y otro fino; el lijado grueso se lo realiza con el fin de retirar irregularidades en la superficie., mientras que el lijado fino se lo hace para retirar líneas del lijado grueso. Las lijas para el desbaste grueso están desde la 100 hasta la lija 600 y para el lijado fino se lo realizó con lijas 800, 1000, 1200, 1500 y 2000. Para este proceso se utilizó el portalijs que posee un sistema de circulación de agua constante, este banco se encuentra en el Laboratorio de Materiales de la Facultad de Mecánica de la ESPOCH.



Figura 19-2. Portalijs

Fuente: Medina, E., Vaca, R. 2020

4. Pulido

Para el proceso de pulido se lo realiza en la pulidora que se encuentra en el Laboratorio de Materiales. La misma que cuenta con un paño sintético en el cual se coloca alúmina como abrasivo de $0.1\mu\text{m}$ con el fin de obtener una superficie tipo espejo en las muestras.



Figura 20-2. Pulidora

Fuente: Medina, E., Vaca, R. 2020



Figura 21-2. Probetas con acabado superficial tipo espejo.

Fuente: Medina, E., Vaca, R. 2020

5. Ataque químico

De acuerdo a la norma ASTM E407 – 07 (Standar Practice for Microetching Metals and Alloys), el ataque químico se lo realizó con Ácido Nítrico (1-5ml HNO_3) + Etanol (95%). La norma indica que la inmersión se debe realizar por unos pocos segundos, sin exceder el minuto; en este caso se mantuvo por 10 segundos. Este ataque químico se lo realiza con el fin de diferenciar las fases presentes en las muestras.

2.9.2. Ensayos de microdureza

El objetivo de realizar este ensayo es obtener un perfil de durezas en la junta soldada. Para esto se empleó la norma ASTM E 384, la misma que cubre la determinación de la dureza de microindentación de los materiales. Se realizó la medición de este tipo de durezas al tener un espesor de material de 4mm y 6mm.

Esta norma de prueba cubre las pruebas de microindentación realizadas con penetradores Knoop y Vickers bajo fuerzas de prueba en el rango de 9.8×10^{-3} a 9.8 N (1 a 1000 gf). La norma recomienda que para que el resultado sea más preciso las caras de las muestras deben poseer superficies planas y uniformes (ASTM E384, 2017, p. 1).

El indentador para medición de dureza Vickers, tiene forma piramidal de base cuadrada de diamante con ángulos de cara de 136° .

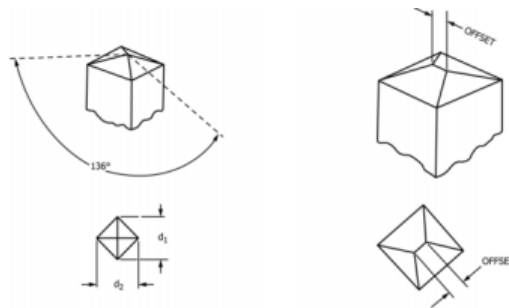


Figura 22-2. Identador Vickers

Fuente: (ASTM E384, 2017, p. 1)



Figura 23-2. Equipo para medición de microdureza

Fuente: Medina, E., Vaca, R.2020

En la investigación se aplicó una fuerza de 300 gf.

El cálculo del valor de microdureza se lo realiza mediante la ecuación 25.

$$HV = 1,8544 * P_1/d_1^2 \quad (24)$$

Donde:

P_1 : Fuerza en gf

d_1 : Longitud media de la diagonal de las indentaciones, en mm.

2.10. Metodología para la realización de ensayos mecánicos

2.10.1. Metodología para ensayo de tracción

Previo a la obtención de probetas para los diferentes ensayos se realizó el corte de cupones de soldadura de menor tamaño para la preparación de probetas y también se procedió a enderezar las placas soldadas. Todos los procedimientos se lo realizaran bajo las diferentes normas.

Para la obtención de probetas de ensayos de tracción se lo realizó mediante la norma AWS B4.0 Standard Methods for Mechanical Testing of Welds, la misma que determina métodos estándar para pruebas mecánicas de soldaduras. Entre ellas el ensayo de tracción. Para la preparación del mismo, se observa que la parte del redondeo de la muestra únicamente se debe realizar mediante un mecanizado por lo que estas probetas serán realizadas en la fresa CNC, que se encuentra en el laboratorio de CAD CAM de la Facultad de Mecánica (ESPOCH), mientras que las otras caras pueden ser cortadas térmicamente.

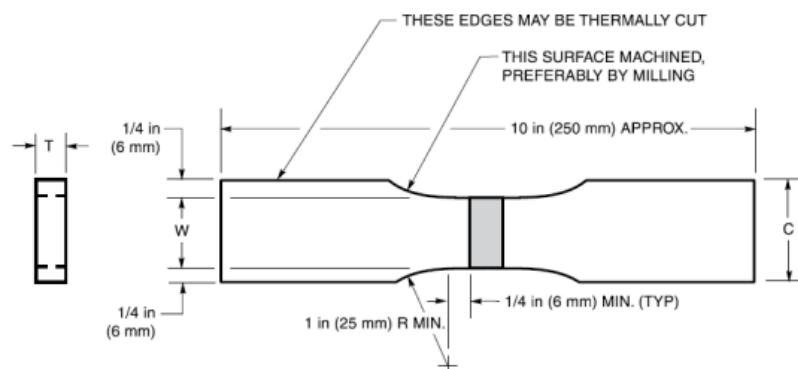


Figura 24-2. Probeta de tracción.

Fuente: (AWS B4.0, 2016)

La dimensión W se obtiene a partir de la siguiente tabla:

Tabla 20-2: Obtención de dimensiones probeta de tracción

T	W
<1 in (25mm)	1,5 in \pm 0,01 in (38 mm \pm 0,25 mm)
\geq 1 in (25mm)	1,5 in \pm 0,01 in (25 mm \pm 0,25 mm)

Fuente: (AWS B4.0, 2016)

Las dimensiones de la probeta son las siguientes:

Tabla 21-2: Dimensiones probeta de tracción

C	dimensión de la sección de agarre	50 mm
T	espesor de muestra	4 y 6 mm
W	ancho de muestra	38 mm

Realizado por: Medina, E., Vaca, R.

Para la realización de la probeta se modelo la misma en el software Nx, para posteriormente realizar el código en el software CIMCO para la “Fresadora CNC ROMI D600”, Figura 25-2 .

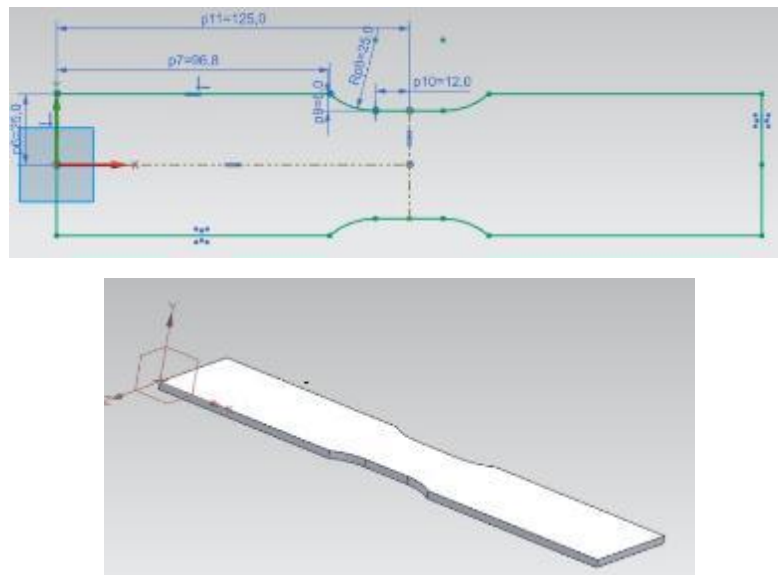


Figura 25-2. Probeta de tracción software Nx.

Realizado por: Medina, E., Vaca, R.2020



Figura 26-2. Fresadora CNC ROMI D600

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020



Figura 27-2. Sujeción de placas soldadas.

Fuente: Medina, E., Vaca, R. 2020



Figura 28-2. Obtención de probetas de tracción.

Fuente: Medina, E., Vaca, R. 2020

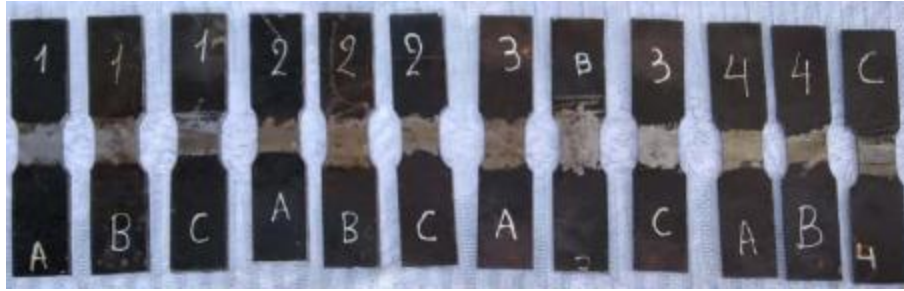


Figura 29-2. Probetas para ensayos de tracción ASTM 36.

Fuente: Medina, E., Vaca, R. 2020



Figura 30-2. Probetas para ensayos de tracción ASTM 572 Gr.50

Fuente: Medina, E., Vaca, R. 2020

2.10.1.1. *Ensayo de tracción*

Los ensayos de tracción se realizaron en la maquina universal del laboratorio del Centro de Fomento Productivo Metalmeccánico Carrocero, ubicado en la ciudad de Ambato. Los parámetros utilizados para el ensayo se detallan en la tabla a continuación.

Tabla 22-2: Parámetros de ensayo de tracción.

Método de ensayo	AWS B4.0 (AWS D1.1)
Tipo de probeta	Plana
Equipo utilizado	Máquina de ensayos universal para metales Metro Test 1500 kN
Velocidad de ensayo	10 mm/min
Precarga	5000 N

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

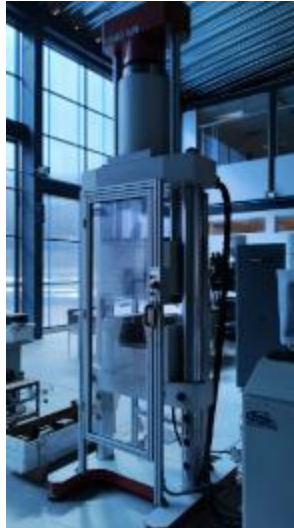


Figura 31-2. Máquina Universal.

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

Para el cálculo de la resistencia última a la tracción (esfuerzo) se empleó la ecuación 25.

$$\text{Resistencia última a la tracción} = \frac{\text{carga máxima}}{\text{Area original}} = \frac{P_{m\acute{a}x.}}{W \times T} \quad (25)$$

Donde:

$P_{m\acute{a}x}$: Carga máxima aplicada.

W : ancho original

T : espesor original

2.10.2. Metodología de Ensayo de impacto

Las muestras serán obtenidas a partir de la norma ASTM E 23 Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. Cabe recalcar que no se usará la norma AWS B4.0 que detalla el proceso para ensayos de juntas soldadas ya que el espesor de las placas de pruebas son de 4mm y 6mm y en esta norma únicamente encontramos para un espesor de 10mm, por lo tanto se optó por buscar una norma en la que se puedan encontrar el procedimiento para espesores menores.

Después del proceso de corte mediante una cortadora abrasiva de muestras más pequeñas. De las dimensiones detalladas en la figura 33-2.

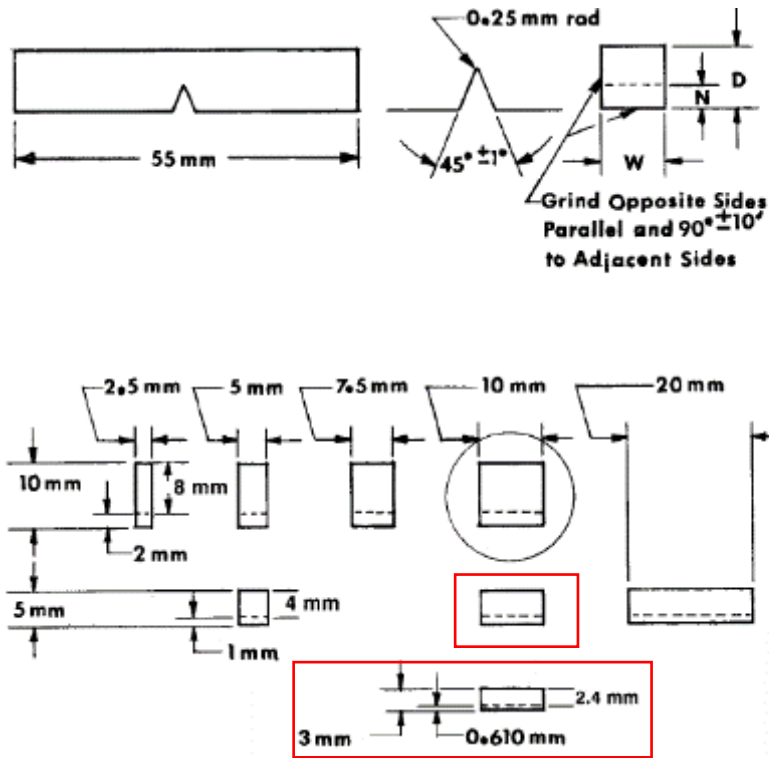


Figura 32- 2. Dimensiones de probetas de impacto

Fuente: (ASTM E23, 2011, p.17)

Donde:

D: profundidad

N: profundidad de muesca

W: ancho

Como se observa no se toma las dimensiones para la profundidad D, se toman las dimensiones de 3mm y 5mm. Para lo cual fue necesario realizar un mecanizado con el fin de reducir el espesor de las muestras y así poder obtener las dimensiones que indica la norma.

Primero se deben igualar las caras de las muestras y a su vez disminuir el espesor mediante una rectificadora plana.



Figura 33-2. Mecanizado de probetas de impacto

Fuente: Medina, E., Vaca, R.

Para realizar la muesca que se requiere según la norma, se utiliza una limadora.



Figura 34-2. Mecanizado de muesca- ensayo de impacto.

Fuente: Medina, E., Vaca, R.



Figura 35-2. Probetas de para ensayo de impacto.

Fuente: Medina, E., Vaca, R. 2020

2.10.2.1. *Ensayo de impacto*

Los ensayos de impacto se realizaron en un péndulo Charpy del laboratorio del Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero, ubicado en la ciudad de Ambato.



Figura 36-2. Péndulo Charpy

Fuente: Medina, E., Vaca, R. 2020

CAPÍTULO III

3. MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En el presente capítulo se describen todos los resultados obtenidos a partir de ensayos metalográficos y mecánicos, así como también los resultados de los cálculos de temperaturas de precalentamiento y el ciclo térmico obtenido para cada junta soldada sin precalentamiento y con la aplicación de temperaturas de precalentamiento.

3.1. Cálculo de temperatura de precalentamiento

3.1.1. Cálculo de temperatura de precalentamiento – Método Seferian.

Para el acero ASTM A36 se realizó un cálculo dependiendo de su composición química, este acero se adquirió en la empresa DIPAC de la ciudad de Riobamba. Obteniéndose la composición química en los catálogos proporcionados por la empresa y que se muestran en la tabla 1-3.

Tabla 1-3: Composición química acero ASTM A36

Composición Química						Propiedades Mecánicas		
%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Cu	Fluencia (MPa)	Esfuerzo Máximo (MPa)	Alargamiento %
0,25-0,29	0,8-1,2	0,04 máx.	0,05 máx.	0,4 máx.	0,2 máx.	250 min.	440 min 550max	20 min

Fuente: (DIPAC)

Realizado por: Medina, E; Vaca, R. 2020

El cálculo se lo realizó mediante las ecuaciones 1, 2, 3 y 4 detalladas en el capítulo II.

En la tabla 2-3 se muestra el cálculo de temperatura de precalentamiento para el acero ASTM A36 por el método de Seferian.

Tabla 2-3: Cálculo de temperatura de precalentamiento. Método de Seferian. Acero ASTM A36.

ASTM A36	Espesor [mm]	6
----------	--------------	---

C	0,26
Mn	0,80
Cr	0,00
Ni	0,00
Mo	0,00

C_{eq}	0,35
C_{ce}	0,01
C_{et}	0,36
T_p	115,74

Realizado por: Medina, E; Vaca, R. 2020

Obteniéndose para el acero ASTM A36 de 6mm de espesor una temperatura de 115,7 °C.

La adquisición del acero ASTM A572 Gr.50 se lo realizo en la empresa Kubiec de la ciudad de Quito. Los datos de composición química del acero que fueron entregados por la empresa se detallan en la tabla 3-3.

Tabla 3-3: Composición química Acero ASTM A572 Gr. 50

Composición Química				
%C	%Mn	%P	%S	%Si
0,23	1,35 máx.	0,04 máx.	0,05 máx.	0,4 máx.

Fuente: (Kubiec)

Realizado por: Medina, E; Vaca, R.2020

De igual forma se realizó el cálculo con temperatura de precalentamiento según las ecuaciones 8, 9, 10 y 11.

En la tabla 4-3 se muestra el cálculo de temperatura de precalentamiento para el acero ASTM A36 por el método de Seferian.

Tabla 4-3: Cálculo de temperatura de precalentamiento. Método de Seferian. Acero ASTM A572 Gr.50

A572	Espesor [mm]	4
------	--------------	---

C	0,23
Mn	1,35
Cr	0
Ni	0
Mo	0

Ceq=	0,38
Cee=	0,0076
Cet=	0,38
Tp=	129,83

Realizado por: Medina, E; Vaca, R. 2020

Obteniéndose para el acero ASTM A5772 Gr. 50 de 4mm de espesor una temperatura de 129,8 °C.

3.1.2. Cálculo de temperatura de precalentamiento – Método B.W.R.A

Para calcular la temperatura de precalentamiento por medio de este método se debe calcular el carbono equivalente mediante la ecuación 12. De igual manera la composición química de cada acero se encuentra detallada en las tablas 1-3 y 2-3.

$$CE = \%C + \% \frac{Mn}{20} + \% \frac{Ni}{15} + \% \frac{(Cr+Mo+V)}{10} \quad (5)$$

Para el cálculo del número de severidad térmica (N.T.S) del acero ASTM A36. Se lo realiza mediante la figura 1-3.




Tipo de empalme	C	Espesor de las placas mm	NTS
	Dos caminos de dispersión de calor	6 y 6	2
		6 y 12	3
		6 y 18	4
		12 y 12	4
		24 y 24	8
		24 y 28	12

Figura 1-3. Determinación de N.T.S.

Fuente: (Pástor, 2002, p.137)

Realizado por: Medina, E; Vaca, R. 2020

Para el cálculo de N.T.S del acero ASTM A572 Gr. 50, se lo realiza utilizando la ecuación 6, donde el parámetro C, se lo encuentra en la figura 1-3, tomando en cuenta que el diseño de la junta soldada tiene dos caminos de dispersión de calor.

El electrodo utilizado para el procedimiento de soldadura es el E6011, es un electrodo celulósico. El método B.W.R.A no considera este tipo de electrodos para realizar cálculos de temperaturas de precalentamiento. Por lo cual para determinar una temperatura de precalentamiento y poderla comparar con los otros métodos de cálculo se escogen electrodos de Rutilo, ya que si se selecciona un electrodo básico no se puede encontrar ninguna temperatura de precalentamiento. Cabe recalcar que no sería correcto hacer un análisis del índice de soldabilidad porque no conocemos el efecto en este índice para electrodos celulósicos.

El acero ASTM A36 tiene un CE de 0,33, mientras que el acero ASTM A572 Gr. 50 el CE es de 0,36. Obteniéndose un índice de soldabilidad E. Como se muestra en la figura 2-3.

Carbono Equivalente		Letra que define en el índice de soldabilidad
Para soldadura con electrodo de Rutilo	Para soldadura con electrodos Básicos	
Hasta $CE = 0.2$	Hasta $CE = 0.2$	A
De 0,21 a 0,23	De 0,26 a 0,30	B
De 0,24 a 0,27	De 0,31 a 0,35	C
De 0,28 a 0,32	De 0,36 a 0,40	D
De 0,33 a 0,38	De 0,41 a 0,45	E
De 0,39 a 0,45	De 0,46 a 0,50	F
> 0,45	> 0,50	G

Figura 2-3. Determinación de Índice de soldabilidad.

Fuente: (Pástor, 2002, p.137)

Realizado por: Medina, E; Vaca, R. 2020

La temperatura de precalentamiento se determina en base a la tabla 4-1. El diámetro del electrodo es de 1/8 in equivalente a 3,2 mm. El procedimiento se lo observa en la figura 3-3.

Índice de severidad térmica	Índice de soldabilidad	Temperatura mínima de precalentamiento °C				
		Diámetro de electrodos en milímetros				
		3.2	4	5	6	8
NTS 2	D	0				
	E	50	0			
	F	125	25			

Figura 3-3. Temperatura de precalentamiento B.W.R.A

Fuente: (Pástor, 2002)

Realizado por: Medina, E; Vaca, R. 2020

En la tabla 5-3 se muestra el cálculo de temperatura de precalentamiento para cada acero por el método B.W.R.A.

Tabla 5-3: Cálculo de la temperatura de precalentamiento. Método B.W.R.A

A36	Espesor [mm]	6
-----	--------------	---

Composición química	
C	0,27
Mn	1,2
Cr	0
Ni	0
Mo	0
V	0

Ceq=	0,33
NST	2
C	2
Índice de soldabilidad	C

electrodo	Básico
Tp=	50

A572

Espesor [mm] 4

Composición química	
C	0,23
Mn	1,35
Cr	0,4
Ni	0
Mo	0
V	0,15

Ceq=	0,35
NST	1,3 ≈ 2
C	2
Índice de soldabilidad	D
electrodo	Básico
Tp=	50

Realizado por: Medina, E; Vaca, R. 2020

3.1.3. Cálculo de temperatura de precalentamiento – AWS D1.1 Anexo H.

Para realizar los cálculos mediante el anexo H, de igual manera se debe calcular el carbono equivalente. Mediante la ecuación 8.

$$CE = C + \frac{(Mn+Si)}{6} + \frac{(Cr+Mo+V)}{5} + \frac{(Ni+Cu)}{15} \quad (8)$$

El carbono equivalente para el acero ASTM A36 es de 0,48 y el porcentaje de carbono es 0,26%. Mientras que para el acero ASTM A572 Gr. 50 es de 0,55 48 y el porcentaje de carbono es 0,23%.

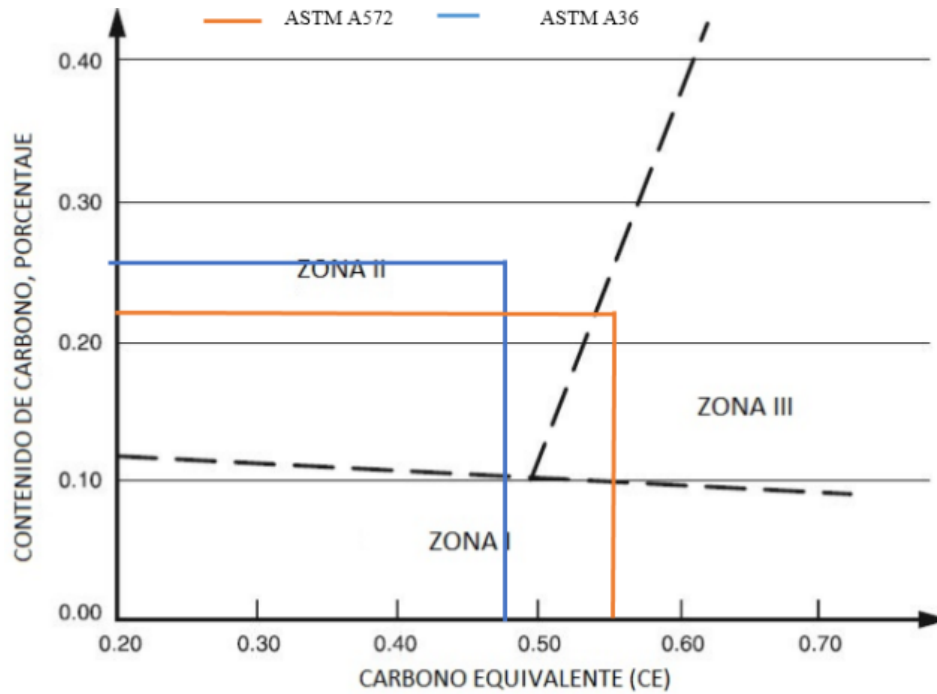


Figura 4-3. Localización de zonas de aceros.

Fuente: (AWS D1.1 Anexo H, 2015)

Realizado por: Medina, E; Vaca, R. 2020

Para el acero ASTM A36 se obtuvo la zona II. En el caso de *Zona II* el anexo H de la American Welding Society recomienda realizar el cálculo de temperatura de precalentamiento usando el método del hidrógeno para determinar el precalentamiento.

Para el acero ASTM A572 Gr. 50 se determina la *Zona III* mediante el anexo H de la American Welding Society se debe utilizar el método de control de hidrógeno.

El primer paso en el método de control de Hidrógeno es calcular el valor de P_{cm} empleando la ecuación 15. Los valores de P_{cm} para cada tipo de acero se muestran en la tabla 6-3, tanto para el acero ASTM A36 y ASTM A572 Gr. 50.

$$P_{cm} = C + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (15)$$

Tabla 6-3: Cálculo el valor de Pcm

ASTM A36		Espesor [mm]	6
C	0,27		
Mn	0,8		
Si	0,4		
Ni	0		
Cr	0		
Mo	0		
V	0		
B	0		
Cu	0,2		
Pcm	0,333		

ASTM A572		Espesor [mm]	4
C	0,23		
Mn	1,35		
Si	0,4		
Ni	0		
Cr	0		
Mo	0		
V	0,15		
B	0		
Cu	0		
Pcm	0,326		

Realizado por: Medina, E; Vaca, R. 2020

El nivel de hidrogeno se define tomando en cuenta los parámetros, de contenido de hidrogeno y humedad del recubrimiento del electrodo según recomendaciones de la AWS A5.1, para almacenamiento de electrodos en envases herméticamente sellados a temperaturas adecuadas de talladas en el capítulo I. Estas recomendaciones nos dan un nivel de hidrogeno H1 y H2. Mientras que para electrodos que no cumplan con estas recomendaciones de almacenamiento el nivel de hidrógeno es el H3.

Los electrodos empleados en el proceso de soldadura no fueron almacenados en recipientes de control de temperatura o humedad (herméticos), por lo tanto se considera un nivel de Hidrogeno H3.

Para la obtención de los índices de susceptibilidad se lo hacen mediante la figura 5-3 que está en función al carbono equivalente P_{cm} y el nivel de hidrogeno.

Agrupación del Índice de Susceptibilidad en Función del Nivel de Hidrógeno “H” y el Parámetro de Composición P_{cm}					
NIVEL DE HIDROGENO H	Agrupación del Índice de Susceptibilidad				
	Carbono Equivalente = P_{cm}^a				
	< 0.18	< 0.23	< 0.28	< 0.33	< 0.38
H1	A	B	C	D	E
H2	B	C	D	E	F
H3	C	D	E	F	G

Figura 5-3. Índice de Susceptibilidad ASTM A36.

Fuente: (AWS D1.1 Anexo H, 2015)

Realizado por: Medina, E; Vaca, R. 2020

Agrupación del Índice de Susceptibilidad en Función del Nivel de Hidrógeno “H” y el Parámetro de Composición P_{cm} (ver H6.2.3)					
NIVEL DE HIDROGENO H	Agrupación del Índice de Susceptibilidad				
	Carbono Equivalente = P_{cm}^a				
	< 0.18	< 0.23	< 0.28	< 0.33	< 0.38
H1	A	B	C	D	E
H2	B	C	D	E	F
H3	C	D	E	F	G

Figura 6-3. Índice de Susceptibilidad ASTM A572 Gr. 50

Fuente: (AWS D1.1 Anexo H, 2015)

Realizado por: Medina, E; Vaca, R. 2020

Los niveles de restricción deben ser determinados mediante la experiencia, criterio de ingeniería y mediante la investigación y cálculos.

Se escoge un nivel de restricción baja, para juntas soldadas comunes en las que existe una libertad razonable de movimiento de los elementos.

Pre calentamiento Mínimo y Temperatura de <u>Interpase</u> para Tres Niveles de Restricción								
Nivel de Restricción	Espesor mm	Pre calentamiento Mínimo y Temperatura de <u>Interpase</u> (°C)						
		Agrupación del Índice de Susceptibilidad						
		A	B	C	D	E	F	G
Bajo	< 10	< 20	< 20	< 20	< 20	60	140	150
	10-20 incl.	< 20	< 20	20	60	100	140	150
	> 20-38 incl.	< 20	< 20	20	80	110	140	150
	> 38-75 incl.	20	20	40	95	120	140	150
	> 75	20	20	40	95	120	140	150

Figura 7-3. Determinación de temperatura de pre calentamiento Anexo H.

Fuente: (AWS D1.1 Anexo H, 2015)

Realizado por: Medina, E; Vaca, R. 2020

Para el acero ASTM A36 se determina una temperatura de 140°C. Mientras que para el acero ASTM A572 se determina una temperatura de 150°C.

Ya que al tratarse de un trabajo de investigación el presente documento, se procede a elaborar cupones de soldadura a las diferentes temperaturas calculadas.

Tabla 7-3-: Temperaturas de Pre calentamiento

Método de cálculo	Temperatura de pre calentamiento °C	
	A36	A572 GR.50
Seferian	115	130
B.W.R.A	50	50
AWS-Anexo H	140	150

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

Con el fin de comprobar la indecencia de las diferentes temperaturas de pre calentamiento, en las propiedades mecánicas y microestructurales de los diferentes cupones de soldadura elaborados se procedió a realizar la medición de durezas en las probetas elaboradas. Adicionalmente se elaboró un cupón con una temperatura de pre calentamiento de 500°C. Obteniéndose las siguientes durezas para cada probeta.

Tabla 8-3: Dureza Brinell en el cordón de soldadura.

Temperatura °C	DUREZA BRINELL HB
0	185
50	163
115	173
150	160
500	104

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

Tabla 9-3: Dureza Brinell en el metal base.

TEMPERATURA °C	DUREZA BRINELL HB
0	187
50	168
115	163
150	192
500	138

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

Las diferentes mediciones se realizaron en el cordón de soldadura y en el metal base (borde). Se observa que entre las temperaturas de precalentamiento calculadas y la temperatura de 500°C que es una temperatura asumida, hay una disminución notoria de dureza Brinell HB en el cordón de soldadura. Lo cual indica que a temperaturas más altas de precalentamiento se ganan ductilidad. También se observa que las durezas de los cupones de soldadura entre las diferentes temperaturas de precalentamiento y el cupón sin precalentamiento (0°C) los valores de dureza son similares, por lo cual podemos decir que no se van a obtener los resultados esperados en cuanto a propiedades, por lo tanto se asumen temperaturas mayores con el fin de obtener mejores resultados tanto en propiedades mecánicas como en microestructura.

Se conserva las temperaturas de precalentamiento calculadas mediante el método de Seferian, ya que es el método más utilizado para calcular dichas temperaturas. También se toman temperaturas superiores a las calculadas 300 °C y 500°C.

3.2. Cálculo de las velocidades de enfriamiento

Para determinar las velocidades de enfriamiento, inicialmente se realiza el cálculo de las temperaturas de interés, empleando las ecuaciones 17, 18 y 19 detalladas en el capítulo II.

1. Calcular el calor de entrada q/v mediante la ecuación 4.

$$q/v = \frac{nVI}{v} \quad (4)$$

$$q/v = 0,4375 * 10^6 \text{ J/m}$$

El cálculo realizado anteriormente corresponde a la placa de acero ASTM A572 Gr. 50 de 4mm de espesor sin precalentamiento. En la tabla a continuación se muestra los valores usados para cada tipo de acero y la diferente temperatura de precalentamiento.

Tabla 10-3: Calor de entrada

ASTM A572 Gr. 50	
Temperatura de Precalentamiento [°C]	q/v
	[J/m]
Sin precalentamiento	3,92E+05
115	3,04E+05
300	2,92E+05
500	2,56E+05
ASTM A36	
Temperatura de Precalentamiento [°C]	q/v
	[J/m]
Sin precalentamiento	4,06E+05
115	3,25E+05
300	3,01E+05
500	2,67E+05

Realizado por: Medina, E; Vaca, R. 2020

2. Determinar si se trata de una placa gruesa o fina. Para ello, se utiliza el criterio del espesor crítico mediante la ecuación (19). En la tabla 10-3 se observa los elementos necesarios para el cálculo, esta tabla corresponde a la temperatura de 18°C o la temperatura ambiente, para la placa

de acero ASTM A572 Gr.50 de 4mm de espesor. En las tablas siguientes se observa los valores para cada temperatura de precalentamiento.

$$\tau = e \left(\frac{\rho C_p (T_i - T_0)}{H_n} \right)^{1/2} \quad (19)$$

$$\tau = 0,006 \text{ m} * \left(\frac{(8131 \text{ kg/m}^3)(434 \text{ J/kg } ^\circ\text{C})(800 - 18 \text{ } ^\circ\text{C})}{3,13\text{E} + 05 \text{ J/m}} \right)^{1/2}$$

$$\tau = 0,330$$

$$\tau < 0,75 \rightarrow \text{Placa fina}$$

Las temperaturas de interés para aceros están en el rango de 500 - 800°C ya que son las temperaturas a las que dan las diferentes transformaciones microestructurales, para lo cual se calculó el espesor relativo para diferentes temperaturas en dicho rango.

Tabla 11-3: Cálculo de espesor crítico. Acero ASTM A572 Gr. 50

ASTM A572				
Temperatura de precalentamiento [°C]	To [°C]	Ti [°C]	τ	$\tau < 0,75$
Sin precalentamiento	18	800	0,330	placa fina
		700	0,308	placa fina
		600	0,285	placa fina
		500	0,259	placa fina
115	18	800	0,314	placa fina
		700	0,293	placa fina
		600	0,271	placa fina
		500	0,246	placa fina
300	18	800	0,271	placa fina
		700	0,257	placa fina
		600	0,238	placa fina
		500	0,248	placa fina
500	18	800	0,234	placa fina
		700	0,218	placa fina
		600	0,201	placa fina
		500	0,183	placa fina

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

Tabla 12- 3: Cálculo de espesor crítico. Acero ASTM A36

ASTM A36				
Temperatura de precalentamiento [°C]	To [°C]	Ti [°C]	τ	$\tau < 0,75$
Sin precalentamiento	18	800	0,370	placa fina
		700	0,345	placa fina
		600	0,319	placa fina
		500	0,290	placa fina
115	18	800	0,351	placa fina
		700	0,328	placa fina
		600	0,303	placa fina
		500	0,275	placa fina
300	18	800	0,317	placa fina
		700	0,296	placa fina
		600	0,273	placa fina
		500	0,248	placa fina
500	18	800	0,268	placa fina
		700	0,250	placa fina
		600	0,231	placa fina
		500	0,210	placa fina

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

4. Las velocidades de enfriamiento se calculan mediante la ecuación (17) que corresponden a una placa final. La velocidad de enfriamiento varía dependiendo de la temperatura de interés T_i , por lo cual la velocidad de enfriamiento tomada es la promedio de las velocidades calculadas en el rango de 500-800°C dichas velocidades se muestran en la tabla 13-3.

Tabla 13-3: Velocidades de enfriamiento

ASTM A572				
Temperatura de precalentamiento [°C]	To [°C]	Ti [°C]	S [°C/s]	PROMEDIO
Sin precalentamiento	18	800	42,32	24,4
		700	28,04	
		600	17,40	
		500	9,86	
115	18	800	34,57	19,9
		700	22,91	
		600	14,22	
		500	8,06	
300	18	800	19,17	11,1
		700	12,70	
		600	7,88	
		500	4,47	
500	18	800	10,58	6,1
		700	7,01	
		600	4,35	
		500	2,47	
ASTM A36				
Temperatura de precalentamiento [°C]	To [°C]	Ti [°C]	S [°C/s]	PROMEDIO
Sin precalentamiento	20	800	45,18	26,1
		700	29,93	
		600	18,57	
		500	10,53	
115	20	800	36,59	21,1
		700	24,25	
		600	15,04	
		500	8,53	
300	20	800	24,29	14,1
		700	16,10	
		600	9,99	
		500	5,66	
500	20	800	12,50	7,2
		700	8,28	
		600	5,14	
		500	2,91	

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

3.3. Determinación del ciclo térmico para juntas soldadas

Debido a que el metal base localizado junto a la soldadura está sometido a altas temperaturas, lo cual da lugar a la zona afectada térmicamente, por lo cual es importante analizar lo que sucede en dicha zona. La gráfica tiempo temperatura a diferentes distancias de la fuente de calor es de gran importancia en la determinación de la microestructura de la ZAC. Para realizar esta gráfica se realizan los siguientes pasos:

1. Determinar el espesor crítico para determinar si se trata de una placa fina o gruesa. Para esto se aplica la ecuación (23).

A continuación, se observa el cálculo para la placa sin precalentamiento (18°C) de acero ASTM A572 Gr. 50 de 4mm. En las tablas 14-3 hasta la tabla 17-3 se observa los parámetros de cálculo para las juntas soldadas a diferentes temperaturas de precalentamiento y en cada una se establece si es una placa gruesa o fina.

$$d' = \left\{ \frac{q}{2 \rho c_p v} * \left(\frac{1}{773 - T_0} + \frac{1}{1073 - T_0} \right) \right\}^{1/2} \quad (23)$$

$$d' = \left\{ \frac{(5,25E + 05 \text{ MJ/m})}{2 * (8131 \text{ kg/m}^3)(434 \text{ J/kg K})} * \left(\frac{1}{(773 - 291)K} + \frac{1}{(1073 - 291)K} \right) \right\}^{1/2}$$

$$d' = 0,0158 \text{ m}$$

Tabla 14-3: Espesor crítico junta sin precalentamiento

Sin precalentamiento		
Acero	ASTM A36	ASTM A572 Gr. 50
V [V]	25	25
I [A]	75	75
n	0,8	0,8
v [m/s]	0,0032	0,0031
ρ [kg/m3]	7854	8131
Cp [J/kg.K]	434	434
To [°C]	18	18

To[K]	291	291
q/v [MJ/m]	4,06 E+05	3,92 E+05
k [W/mK]	60,5	41
α [m ² /s ⁻¹]	1,77E-05	1,16E-05
d [m]	0,006	0,004
d´[m]	0,0189	0,0158

$d > d^r \rightarrow$ placa gruesa
 $d < d^r \rightarrow$ placa delgada

ASTM A572	PLACA FINA
ASTM A36	PLACA FINA

Realizado por: Medina, E; Vaca, R. 2020

Tabla 15-3: Espesor crítico junta 115°C

115°C		
Acero	ASTM A36	ASTM A572 Gr. 50
V [V]	25	25
I [A]	75	75
n	0,8	0,8
v [m/s]	0,0035	0,00345
ρ [kg/m ³]	7854	8131
Cp [J/kg.K]	434	434
To [°C]	115	115
To[K]	388	388
q/v [MJ/m]	3,25 E+05	3,04 E+05
k [W/mK]	60,5	41
α [m ² /s ⁻¹]	1,77E-05	1,16E-05
d [m]	0,006	0,004
d´[m]	0,0208	0,0185

$d > d^r \rightarrow$ placa gruesa
 $d < d^r \rightarrow$ placa delgada

ASTM A572	PLACA FINA
ASTM A36	PLACA FINA

Realizado por: Medina, E; Vaca, R. 2020

Tabla 16-3: Espesor crítico junta 300°C

300°C		
Acero	ASTM A36	ASTM A572 Gr. 50
V [V]	25	25
I [A]	75	75
n	0,8	0,8
v [m/s]	0,0037	0,0036
ρ [kg/m ³]	7854	8131
Cp [J/kg.K]	434	434
To [°C]	300	300
To [K]	573	573
q/v [MJ/m]	3,01 E+05	3,04 E+05
k [W/mK]	60,5	41
α [m ² /s ⁻¹]	1,77E-05	1,16E-05
d [m]	0,006	0,004
d´[m]	0,0281	0,0253

Realizado por: Medina, E; Vaca, R. 2020

$d > d^r \rightarrow$ placa gruesa
 $d < d^r \rightarrow$ placa delgada

ASTM A572	PLACA FINA
ASTM A36	PLACA FINA

Tabla 17-3: Espesor crítico junta 500°C

500°C		
Acero	ASTM A36	ASTM A572 Gr. 50
V [V]	25	25
I [A]	75	75
n	0,8	0,8
v [m/s]	0,004	0,0039
ρ [kg/m ³]	7854	8131
Cp [J/kg K]	434	434
To [°C]	500	500
To [K]	772	772
q/v	2,67 E+05	2,56 E+05

k [W/m K]	60,5	41
α [m ² /s ⁻¹]	1,77E-05	1,16E-05
d [m]	0,006	0,004
d´[m]	0,0359	0,0327

$d > d'$ → placa gruesa
 $d < d'$ → placa delgada

ASTM A572	PLACA FINA
ASTM A36	PLACA FINA

Realizado por: Medina, E; Vaca, R. 2020

2. En todos los casos se trata de placas finas se aplica la ecuación (22) para determinar las temperaturas pico para diferentes tiempos y distancias desde el centro de la fuente de calor. En las tablas 26-2 hasta 33-2, se encuentran las temperaturas pico a diferentes tiempos y distancias. En los gráficos 1-2 hasta 8-2, se observan los ciclos térmicos para cada junta soldada.

$$T_p = T_0 + \frac{\frac{q}{v}}{d * (4\pi * k * \rho * c_p * t)^{1/2}} \exp\left(-\frac{r^2}{4at}\right) \quad (22)$$

$$T_p = 1276,7 K$$

$$T_p = 1003,7 ^\circ C$$

Tabla 18-3: Ciclo térmico Acero ASTM A36. Sin precalentamiento

		ASTM A36			
r [m]		0,005	0,007	0,009	0,011
t [s]	Tp [C]	Tp [C]	Tp [C]	Tp [C]	Tp [C]
0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0
1	1003,7	720,3	464,9	272,0	
2	849,6	719,9	578,0	440,2	
5	602,7	564,4	517,2	476,3	
10	446,3	432,0	413,7	418,7	
20	326,3	321,1	314,3	306,1	
30	271,2	268,3	264,6	260,0	
40	237,9	236,1	233,6	230,6	
50	215,0	213,7	211,9	209,8	
60	198,1	197,1	195,7	194,1	
100	157,8	157,3	156,7	155,9	
200	117,0	116,9	116,7	116,4	

360	91,9	91,8	91,7	91,6
600	75,2	75,2	75,2	75,1

Realizado por: Medina, E; Vaca, R. 2020

En el grafico 1-3 se observa el ciclo térmico de placa de acero ASTM A36 de 6mm sin precalentamiento (18°C).

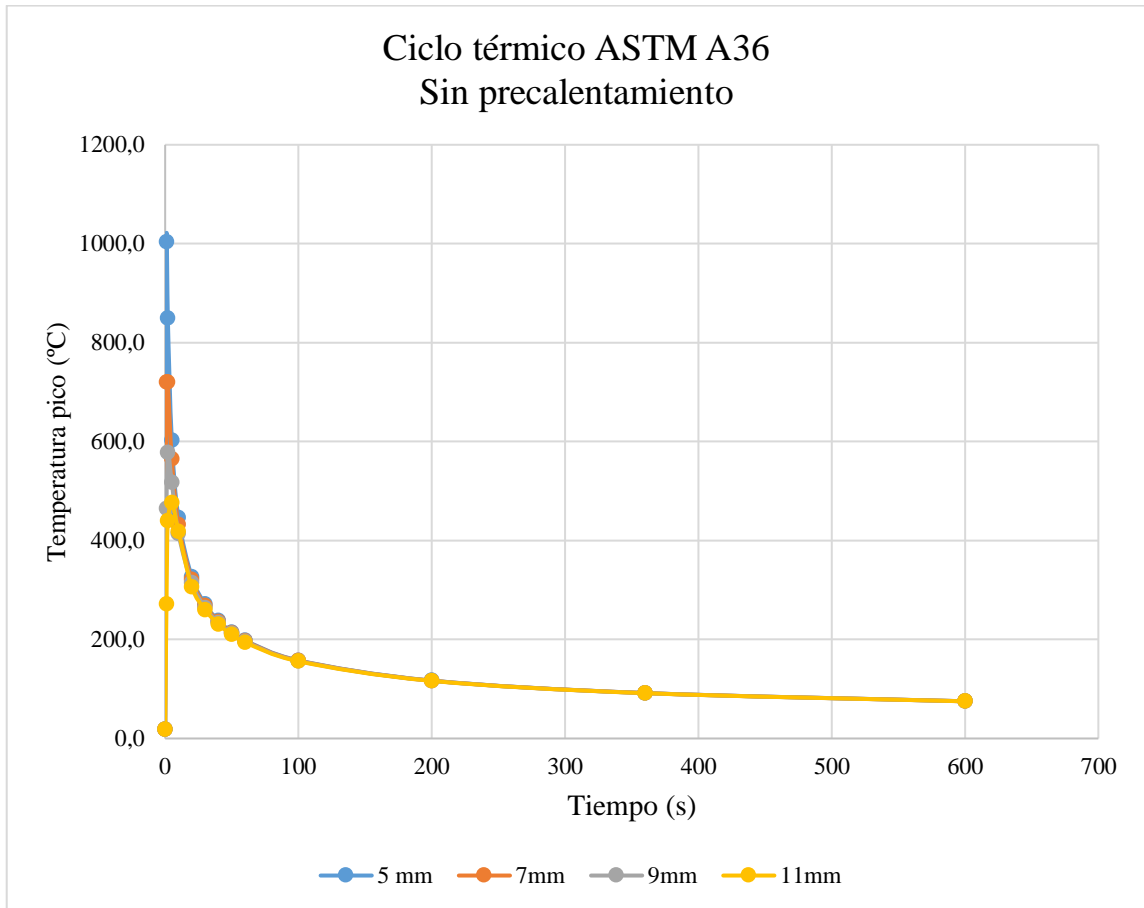


Gráfico 1-3. Ciclo térmico Acero ASTM A36. Sin precalentamiento

Realizado por: Medina, E; Vaca, R. 2020

Tabla 19-3: Ciclo térmico Acero ASTM A572 Gr.50. Sin precalentamiento

r [m]	ASTM A572			
	0,005	0,007	0,009	0,011
t [s]	Tp [C]	Tp [C]	Tp [C]	Tp [C]
0	18	18	18	18
1	1090,2	657,2	338,7	153,4
2	1010,6	784,4	560,9	370,8
5	755,9	683,4	597,6	505,8
10	568,7	540,9	506,0	465,7
20	418,0	407,8	394,6	378,7
30	347,5	341,9	334,6	325,6
40	304,7	301,0	296,2	290,2
50	275,1	272,5	269,0	264,7
60	253,1	251,1	248,4	245,2
100	200,8	199,8	198,6	197,0
200	147,6	147,3	146,8	146,3
360	114,7	114,6	114,4	114,2
600	93,0	92,9	92,8	92,7

Realizado por: Medina, E; Vaca, R. 2020

En el grafico 2-3 se observa el ciclo térmico de placa de acero ASTM A572 Gr.50 de 4mm sin precalentamiento (18°C).

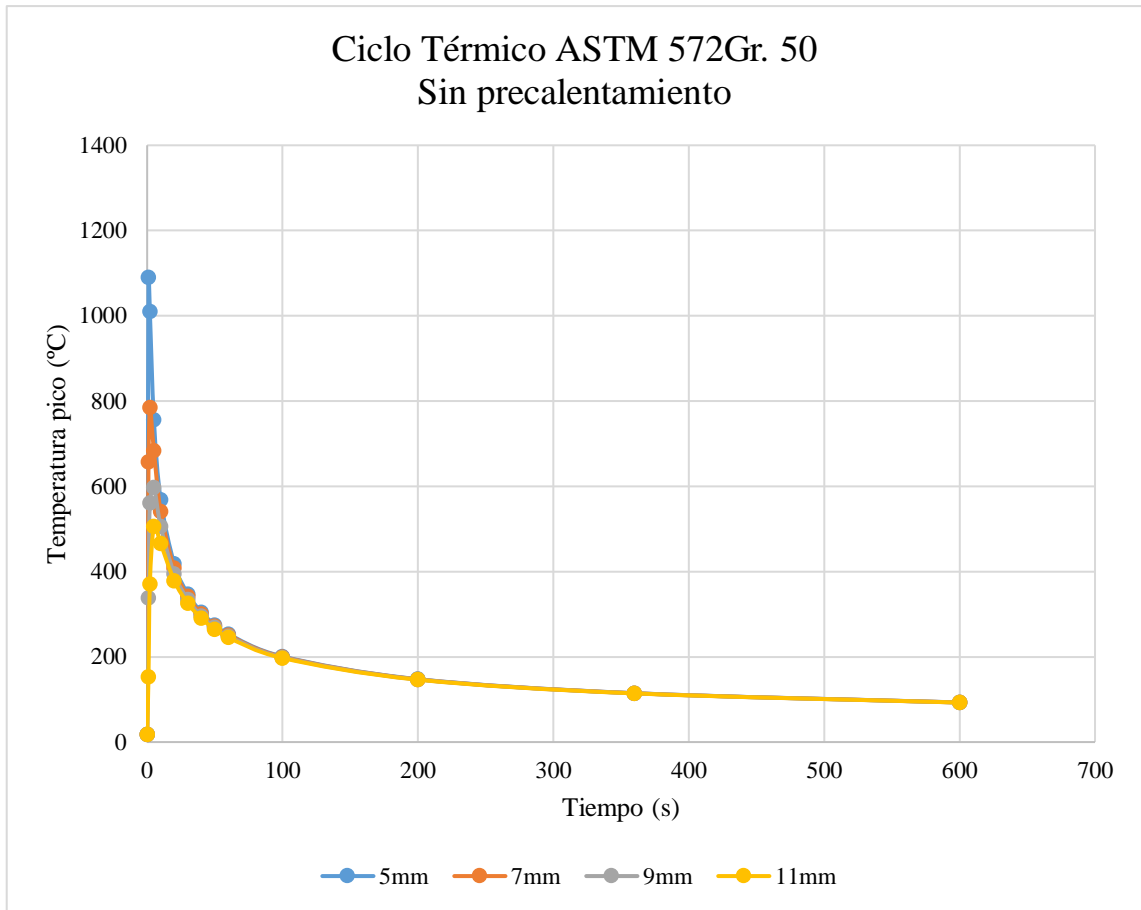


Gráfico 2-3. Ciclo térmico Acero ASTM A572 Gr.50. Sin precalentamiento (18°C)

Realizado por: Medina, E; Vaca, R. 2020

Tabla 20-3: Ciclo térmico Acero ASTM A36. Precalentamiento 115°C.

		ASTM A36			
r [m]		0,005	0,007	0,009	0,011
t [s]	Tp [C]	Tp [C]	Tp [C]	Tp [C]	Tp [C]
0	115	115	115	115	115
1	1043,8	776,8	536,1	354,4	
2	898,6	776,4	642,7	512,8	
5	666,0	629,9	585,4	535,1	
10	518,6	505,2	487,9	467,4	
20	405,5	400,6	394,2	386,4	
30	353,6	350,9	347,4	343,0	
40	322,2	320,5	318,2	315,3	
50	300,7	299,4	297,8	295,7	

60	284,7	283,7	282,5	280,9
100	246,8	246,3	245,7	245,0
200	208,3	208,2	208,0	207,7
360	184,6	184,6	184,5	184,4
600	168,9	168,9	168,9	168,8

Realizado por: Medina, E; Vaca, R. 2020

En el grafico 3-3 se observa el ciclo térmico de placa de acero ASTM A36 de 6mm con un precalentamiento de 115°C.

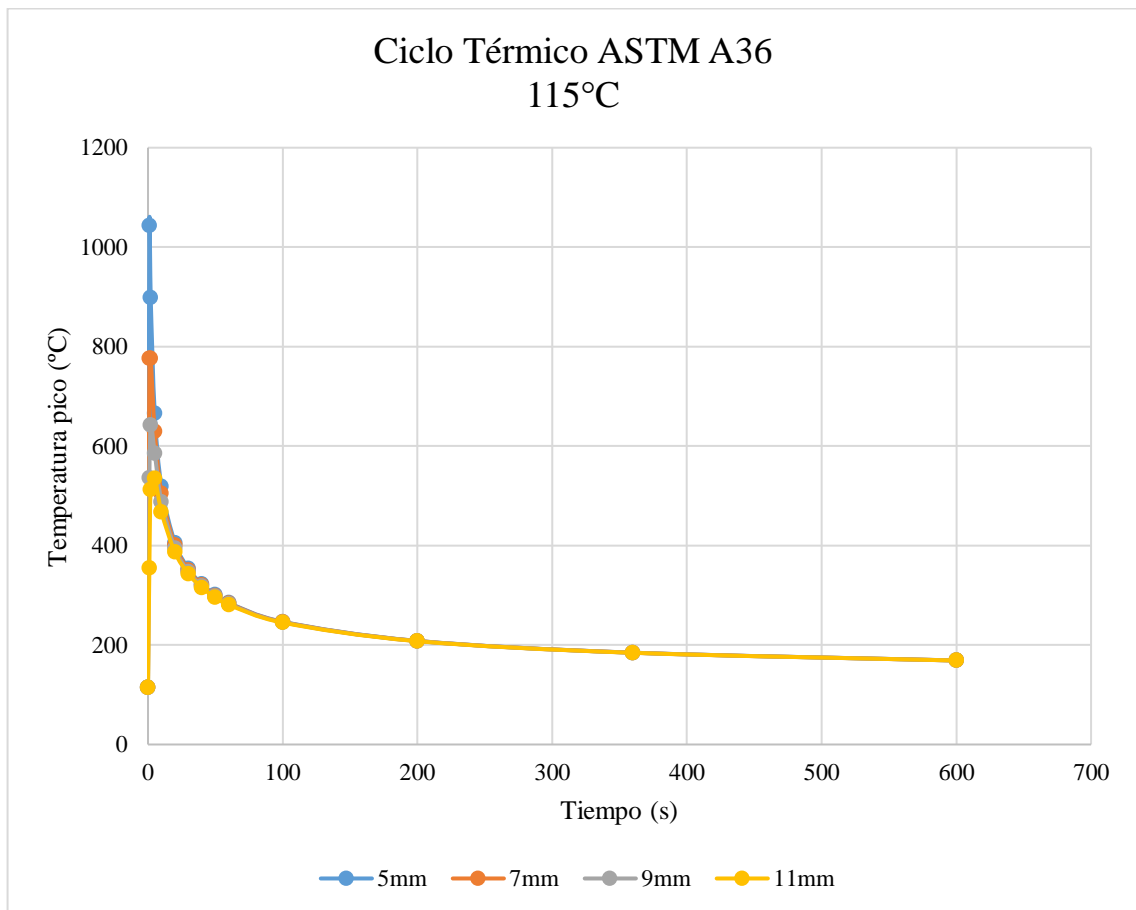


Gráfico 3-3. Ciclo térmico Acero ASTM A36. Precalentamiento 115°C.

Realizado por: Medina, E; Vaca, R. 2020

Tabla 21-3: Ciclo térmico Acero ASTM A572 Gr.50. Pre calentamiento 115°C.

	ASTM A572			
r [m]	0,005	0,007	0,009	0,011
t [s]	 Tp [C]	 Tp [C]	 Tp [C]	 Tp [C]
0	115	115	115	115
1	1156,1	847,0	426,4	246,5
2	1078,8	859,2	642,1	457,5
5	831,5	761,1	677,8	588,7
10	649,7	622,7	588,9	549,8
20	503,4	493,5	480,7	465,2
30	435,0	429,5	422,4	413,7
40	393,4	389,8	385,1	379,3
50	364,7	362,1	358,7	354,5
60	343,3	341,4	338,8	335,6
100	292,5	291,6	290,4	288,9
200	240,8	240,5	240,1	239,5
360	208,9	208,8	208,6	208,4
600	187,8	187,7	187,6	187,5

Realizado por: Medina, E; Vaca, R. 2020

En el grafico 4-3 se observa el ciclo térmico de placa de acero ASTM A572 Gr.50 de 4mm con un pre calentamiento de 115°C.

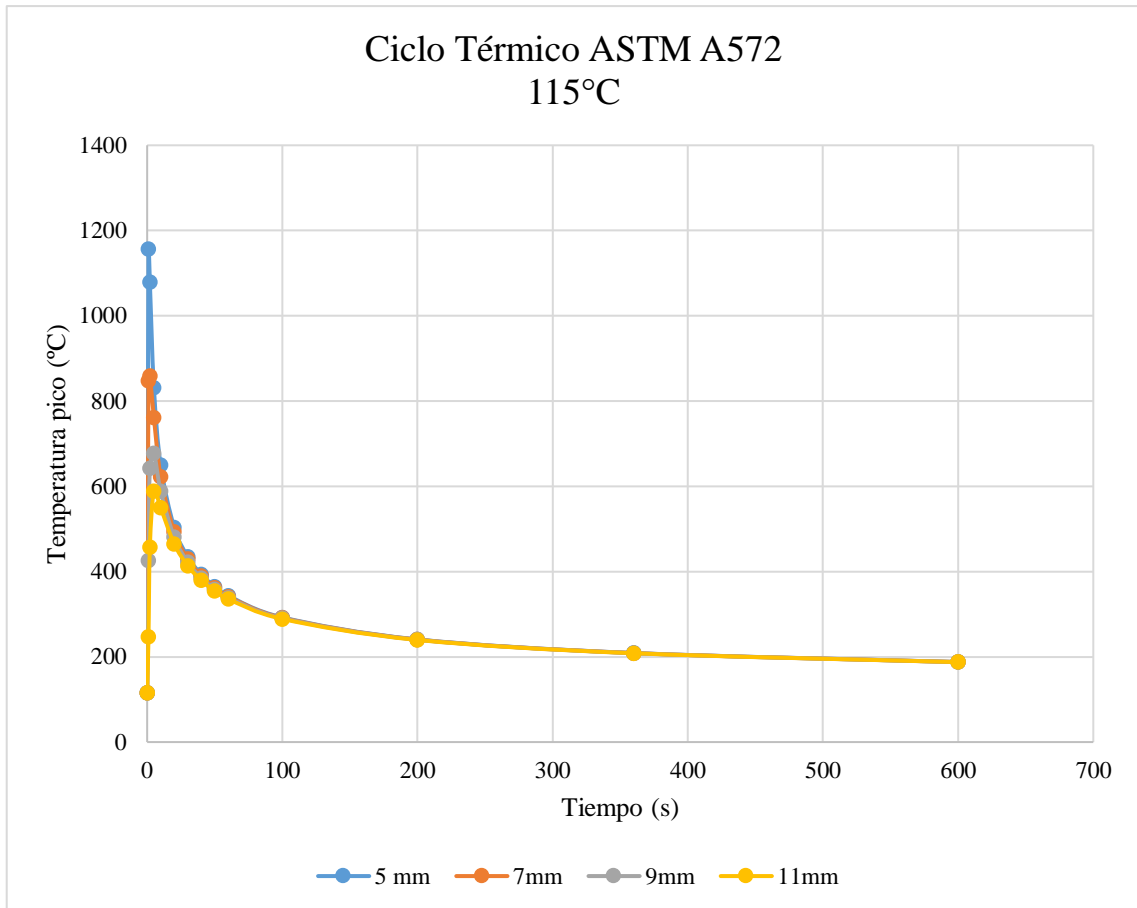


Gráfico 4-3. Ciclo térmico Acero ASTM A572 Gr.50. Pre calentamiento 115°C.

Realizado por: Medina, E; Vaca, R. 2020

Tabla 22-3: Ciclo térmico Acero ASTM A36. Pre calentamiento 300°C.

		ASTM A36			
r [m]		0,005	0,007	0,009	0,011
t [s]	Tp [C]	Tp [C]	Tp [C]	Tp [C]	Tp [C]
0	300	300	300	300	300
1	1132,8	952,7	677,6	514,6	
2	1002,6	922,0	773,1	656,7	
5	794,0	770,5	721,7	676,7	
10	661,9	653,1	634,3	616,0	
20	560,4	557,3	550,3	543,4	

30	513,9	512,2	508,3	504,4
40	485,8	484,7	482,1	479,6
50	466,5	465,7	463,9	462,0
60	452,1	451,5	450,1	448,7
100	418,1	417,8	417,2	416,5
200	396,6	396,4	396,1	395,7
360	362,4	362,4	362,3	362,2
600	348,4	348,3	348,3	348,3

Realizado por: Medina, E; Vaca, R. 2020

En el grafico 5-3 se observa el ciclo térmico de placa de acero ASTM A36 de 6mm con un precalentamiento de 300°C.

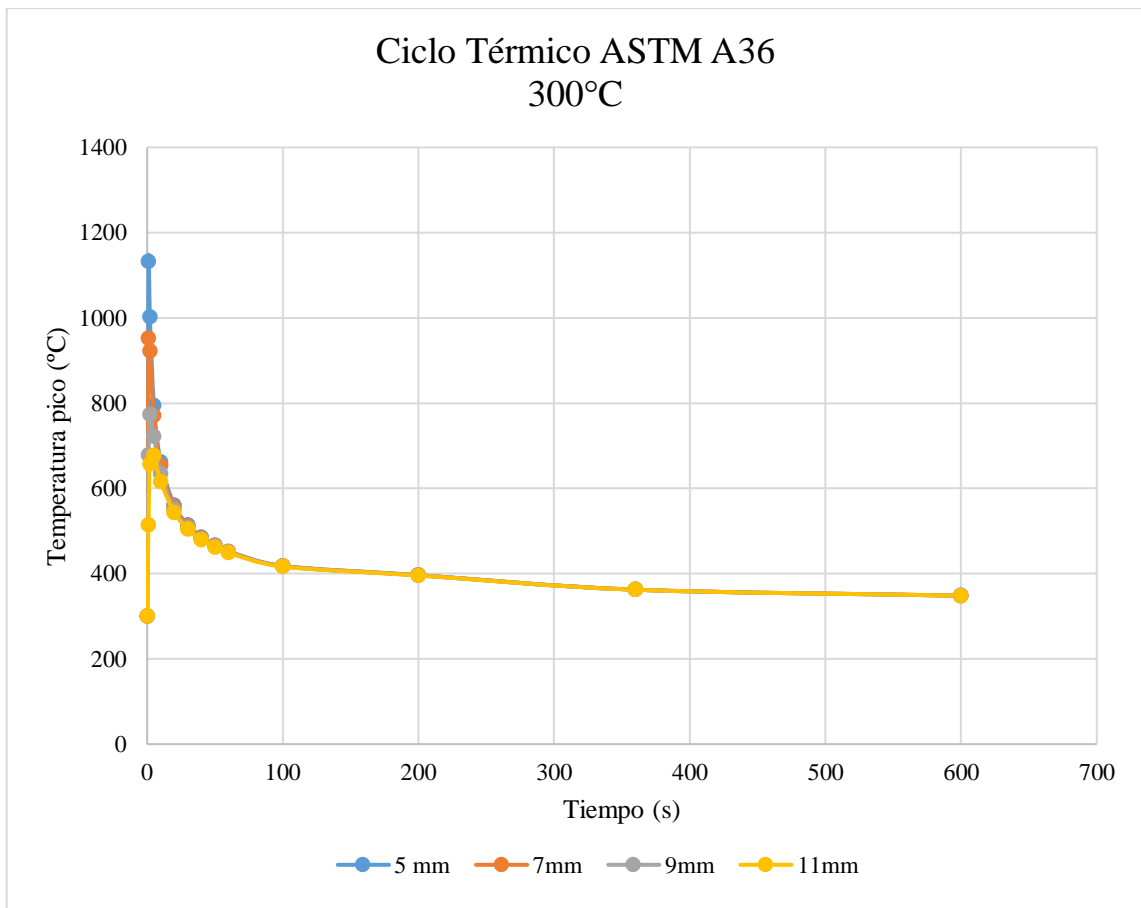


Gráfico 5-3. Ciclo térmico Acero ASTM A36. Precalentamiento 300°C.

Realizado por: Medina, E; Vaca, R. 2020

Tabla 23-3: Ciclo térmico Acero ASTM A572 Gr.50. Pre calentamiento 300°C.

r [m]	ASTM A572			
	0,005	0,007	0,009	0,011
t [s]	Tp [C]	Tp [C]	Tp [C]	Tp [C]
0	300	300	300	300
1	1297,8	894,8	598,5	426,0
2	1223,6	1013,2	805,2	628,3
5	986,6	919,2	839,4	754,0
10	812,4	786,6	754,2	716,6
20	672,2	662,7	650,4	635,6
30	606,7	601,4	594,6	586,2
40	566,8	563,3	558,8	553,3
50	539,3	536,8	533,5	529,6
60	518,8	516,9	514,4	511,4
100	470,1	469,2	468,0	466,6
200	420,6	420,3	419,9	419,4
360	390,0	389,9	389,7	389,5
600	369,8	369,7	369,6	369,5

Realizado por: Medina, E; Vaca, R.2020

En el gráfico 6-3 se observa el ciclo térmico de placa de acero ASTM A572 Gr.50 de 4mm con un pre calentamiento de 300°C.

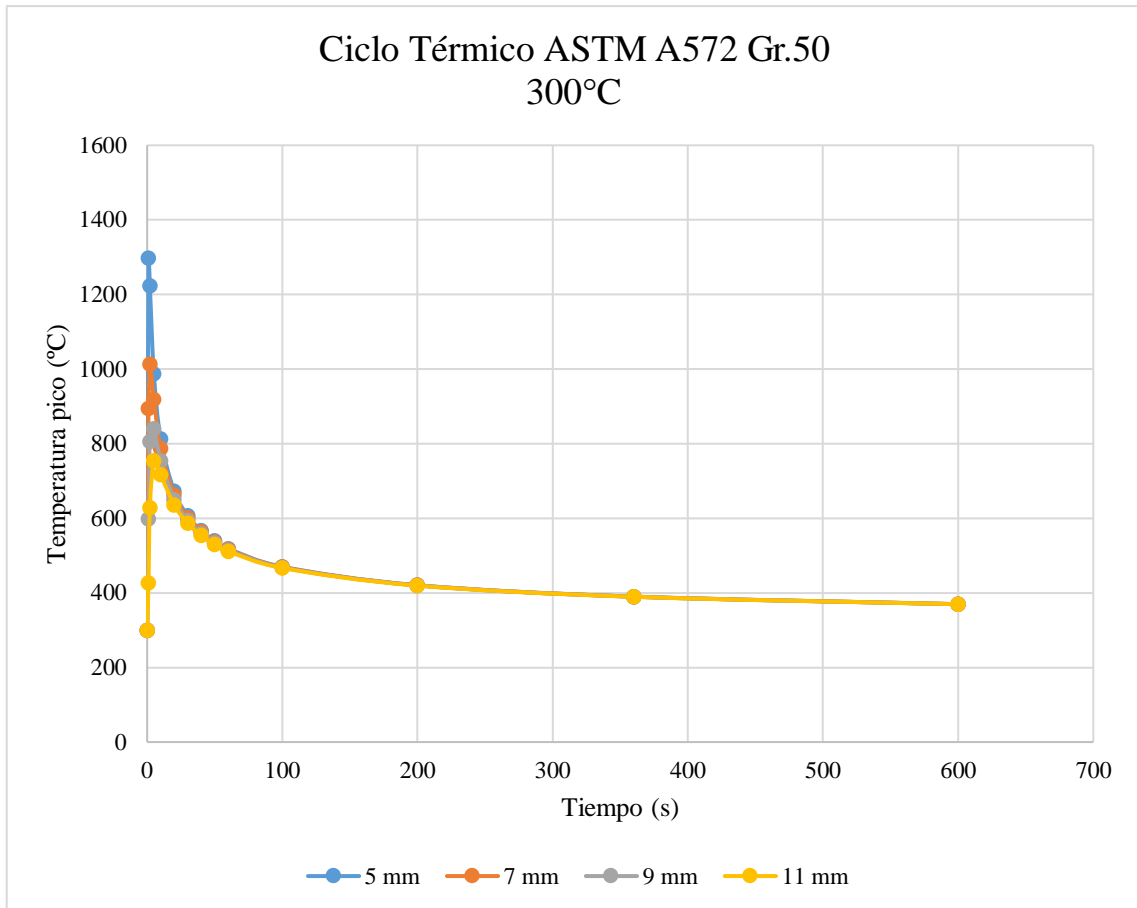


Gráfico 6-3. Ciclo térmico Acero ASTM A572 Gr.50. Pre calentamiento 300°C.

Realizado por: Medina, E; Vaca, R.2020

Tabla 24-3: Ciclo térmico Acero ASTM A36. Pre calentamiento 500°C.

		ASTM A36			
r [m]		0,005	0,007	0,009	0,011
t [s]		Tp [C]	Tp [C]	Tp [C]	Tp [C]
0		500	500	500	500
1		1170,9	1015,0	776,9	635,8
2		1058,2	988,4	859,5	758,7
5		877,6	857,3	815,1	776,1
10		763,2	755,7	739,4	723,5
20		675,4	672,7	666,7	660,7

30	635,2	633,7	630,3	627,0
40	610,8	609,9	607,7	605,5
50	594,1	593,4	591,8	590,2
60	581,7	581,2	580,0	578,8
100	552,3	552,0	551,5	550,9
200	522,4	522,3	522,1	521,9
360	504,0	504,0	503,9	503,8
600	491,9	491,9	491,8	491,8

Realizado por: Medina, E; Vaca, R.2020

En el grafico 7-3 se observa el ciclo térmico de placa de acero ASTM A36 de 6mm con un precalentamiento de 500°C.

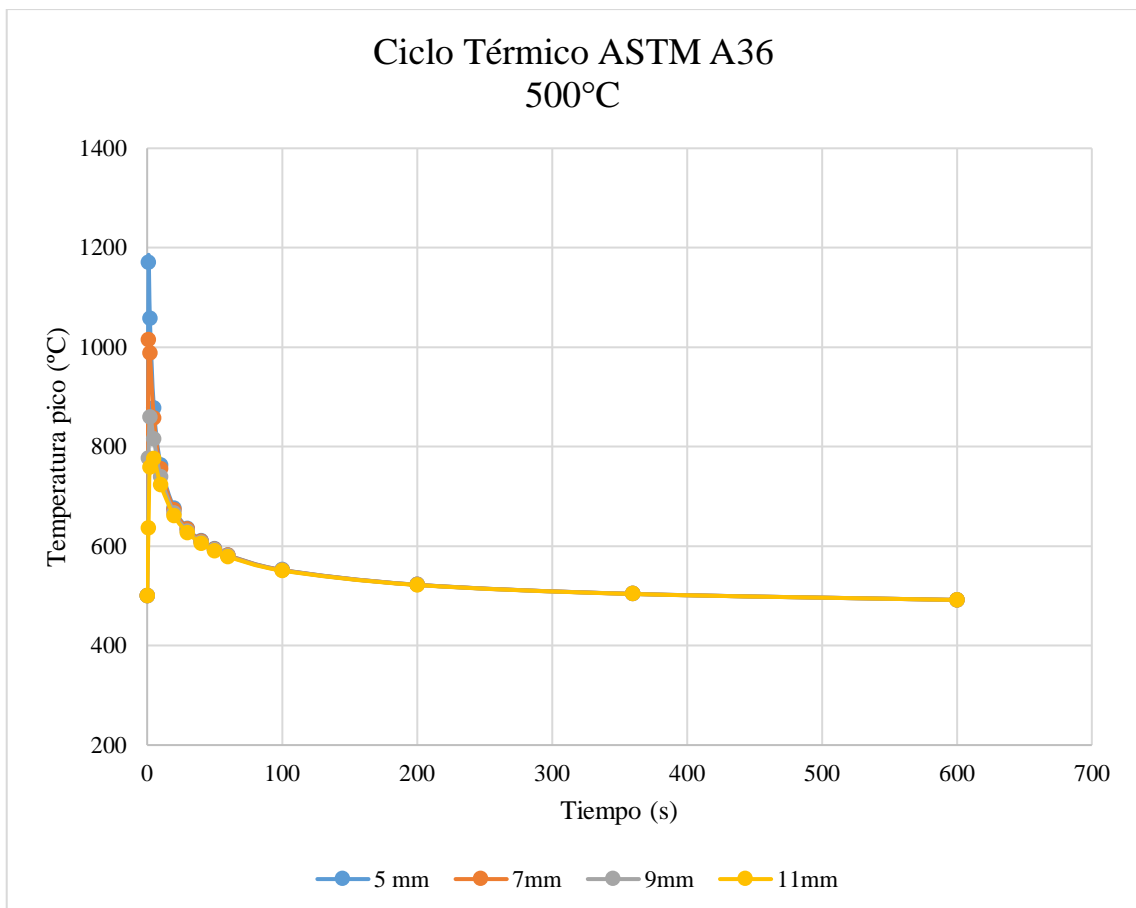


Gráfico 7-3. Ciclo térmico Acero ASTM A36. Precalentamiento 500°C.

Realizado por: Medina, E; Vaca, R.2020

Tabla 25-3: Ciclo térmico Acero ASTM A572. Gr50. Pre calentamiento 500°C.

	ASTM A572			
r [m]	0,005	0,007	0,009	0,011
t [s]	 Tp [C]	 Tp [C]	 Tp [C]	 Tp [C]
0	500	500	500	500
1	1326,1	972,3	712,1	560,7
2	1261,0	1076,2	893,6	738,2
5	1052,9	993,7	923,6	848,6
10	899,9	877,2	848,8	815,8
20	776,8	768,5	757,7	744,7
30	719,3	714,7	708,6	701,3
40	684,2	681,2	677,3	672,4
50	660,1	657,9	655,1	651,6
60	642,1	640,5	638,3	635,6
100	599,3	598,6	597,6	596,3
200	555,9	555,6	555,3	554,8
360	529,0	528,9	528,8	528,6
600	511,2	511,2	511,1	511,0

Realizado por: Medina, E; Vaca, R. 2020

En el grafico 8-3 se observa el ciclo térmico de placa de acero ASTM A572 Gr.50 de 4mm con un pre calentamiento de 500°C.

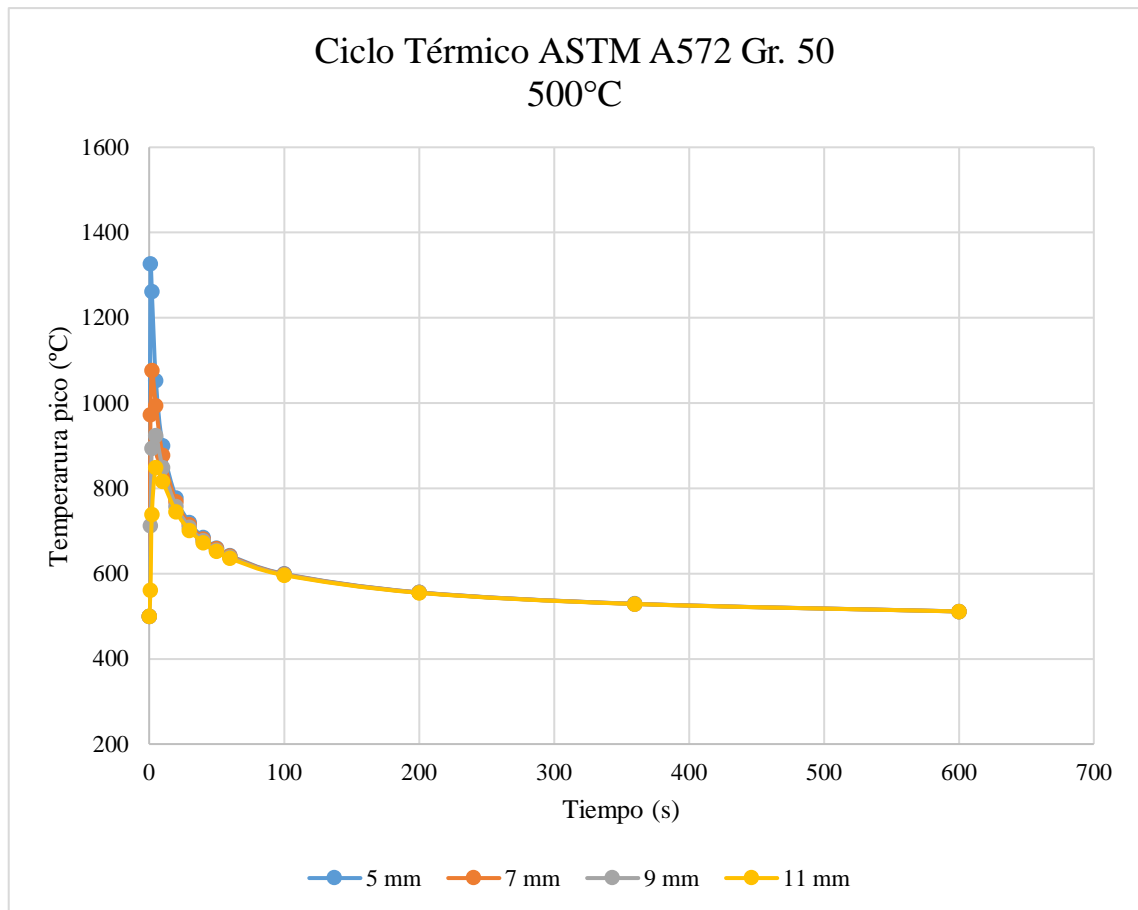


Gráfico 8-3. Ciclo térmico Acero ASTM A572. Gr50. Pre calentamiento 500°C.

Realizado por: Medina, E; Vaca, R. 2020

En la figura 8-3 se observa un diagrama CCT de aceros que poseen una composición similar a la del acero ASTM A36, las velocidades de enfriamiento calculadas para cada temperatura de pre calentamiento se colocaron en el diagrama CCT, para observar el tipo de microestructura teórica que se obtendrá en la ZAC, con las diferentes temperaturas de pre calentamiento en cada placa.

Para la junta soldada sin pre calentamiento (18°C), se obtiene una velocidad de enfriamiento promedio de 26,1°C/s, al realizar la curva de enfriamiento en el diagrama CCT se observa que se obtiene una microestructura conformada por Ferrita, Bainita y Martensita. De igual forma, para la temperatura de pre calentamiento de 115°C, se obtiene una velocidad de enfriamiento de 21,1°C/s, con la que se obtiene una microestructura formada por Ferrita, Bainita y Martensita. Para una temperatura de pre calentamiento de 300°C, se obtuvo una velocidad de enfriamiento de 14°C/s, al trazar esta curva en el diagrama CCT se obtuvo una microestructura conformada por Ferrita, Perlita, Bainita y Martensita. Mientras que, para la temperatura de pre calentamiento de 500°C, se calculó una velocidad de 7,2 °C/s con la que, se obtuvo mediante el diagrama CCT una

microestructura Ferrita, Perlita y Bainita. Estas microestructuras se compararán con las obtenidas mediante metalografía experimental.

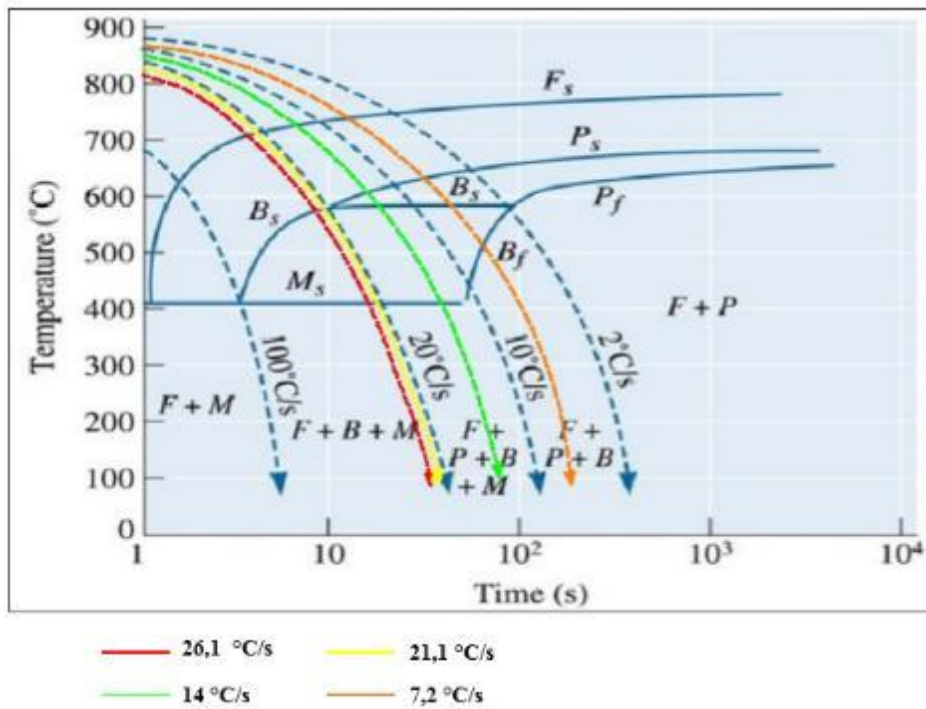


Figura 8-3. Microestructuras teóricas. Acero ASTM A36.

Fuente: (Muhaed, J, 2013)

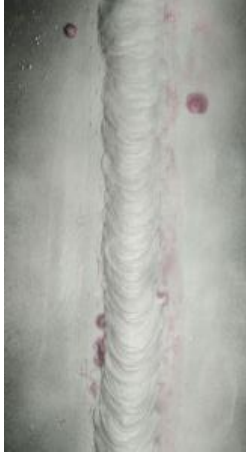
Realizado por: Medina, E; Vaca, R. 2020

3.4. Resultado del ensayo de Tintas Penetrantes

En las tablas 26-3 y 27-3 se puede observar los resultados obtenidos mediante la aplicación de tintas penetrantes en dos juntas soldadas.

Tabla 26-3: Resultados de ensayo de tintas penetrantes acero ASTM A36


Material Base	Acero ASTM A36 - 6mm
Material de Aporte	E 6011
Materiales empleados en la inspección	<ul style="list-style-type: none"> • Limpiador KD- Check SC-1 Aerosol • Penetrante KD- Check RDP-1 Aerosol • Revelador KD- Check PR-1 Aerosol
Descripción de la Junta	Material base: placa de acero ASTM A36- 6mm, separación de 3mm, 280 mm de longitud. Proceso de soldadura SMAW. Temperatura de precalentamiento 115°C.

<p>Fotografía</p>	
<p>Resultados</p>	<p>La junta soldada mediante proceso SMAW, por medio del ensayo PT, se observa que no existen discontinuidades u otras indicaciones que mediante la norma ASTM B1.10M/B1.10:2016, 2016 no sean aceptadas.</p>

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

Tabla 27-3: Resultados de ensayo de tintas penetrantes acero ASTM A572

<p>Material Base</p>	<p>Acero ASTM A572 - 4mm</p>
<p>Material de Aporte</p>	<p>E 6011</p>
<p>Materiales empleados en la inspección</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Limpiador KD-Check SC-1 Aerosol • Penetrante KD-Check RDP-1 Aerosol • Revelador KD-Check PR-1 Aerosol
<p>Descripción de la Junta</p>	<p>Material base: placa de acero ASTM A572 Gr.50-4mm, separación de 3mm, 280 mm de longitud. Proceso de soldadura SMAW. Temperatura de precalentamiento 500°C</p>

<p>Fotografía</p>	
<p>Resultados</p>	<p>La junta soldada mediante proceso SMAW, por medio del ensayo PT, se observa que no existen discontinuidades u otras indicaciones que mediante la norma ASTM B1.10M/B1.10:2016, 2016 no sean aceptadas.</p>

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

3.5. Análisis Metalográfico

3.5.1. Cálculo del tamaño de grano

El cálculo de tamaño de grano se realizará mediante la norma ASTM E112 por el método de Intercepción lineal de Heyn. Se emplean las siguientes ecuaciones para el cálculo del tamaño de grano.

$$\overline{N}_L = \frac{N_i}{L/M}$$

$$G = (6,643856 * \log \overline{N}_L) - 3,288$$

Donde:

\overline{N}_L : Número de intercepciones por unidad de longitud

N_i : Número de intercepciones

L: longitud de las líneas

M: aumento de la micrografía

G: tamaño de grano ASTM.

Para realizar el conteo del número de intercepciones se trazan líneas paralelas en la micrografía como se muestra en la figura a continuación. Al realizar el conteo de los granos se debe tener en cuenta que: si la línea pasa por el grano N_i es igual a 1, si la línea es tangencial a un límite de grano o termina dentro del grano N_i es 0,5. Como se observa en la figura 9-3 donde se observa una micrografía a una ampliación de 400x con una medida de 110 μm y con un ataque químico $\text{HNO}_3 + \text{etanol}$ (95%), fases: ferrita + perlita, según la norma ASTM E407.

En la tabla 28-3 se muestra el tamaño de grano ASTM para cada zona de la soldadura del acero ASTM A36 y en la tabla 29-3 se muestra el tamaño de grano ASTM para las zonas del acero ASTM A572 Gr.50. La micrografía posee una ampliación de 400x.

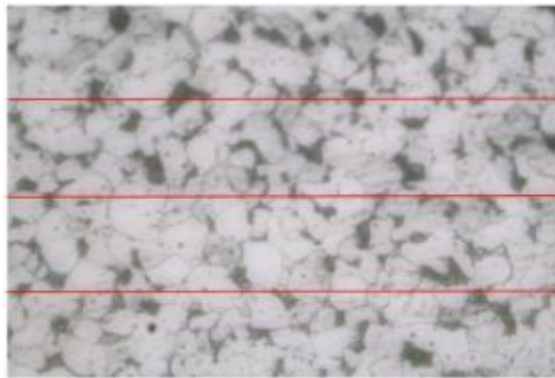


Figura 9-3. Medición de tamaño de grano

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

Tabla 28-3: Tamaño de grano- Acero ASTM A36

ASTM A36					
Cordón-SP					
Línea	L [μm]	Ni	N_L	G	
1	110	11,5	41,82	7,48	7,8
2	110	15	54,55	8,25	
3	110	12,5	45,45	7,72	
ZAC-SP					
Línea	L [μm]	Ni	N_L	G	
1	280	3	10,71	3,55	3,9
2	280	3,5	12,50	4	
3	280	3,5	12,50	4	
Metal Base-SP					
Línea	L [μm]	Ni	N_L	G	
1	110	8,5	30,91	6,61	6,8
2	110	9	32,73	6,78	
3	110	10	36,36	7,08	
Cordón-115°C					
Línea	L [μm]	Ni	N_L	G	
1	110	8,5	30,91	6,61	6,8
2	110	9	32,73	6,78	
3	110	10	36,36	7,08	
ZAC-115°C					
Línea	L [μm]	Ni	N_L	G	
1	280	4	14,29	4,39	4,5
2	280	4	14,29	4,39	
3	280	4,5	16,071	4,73	
Cordón-300°C					
Línea	L [μm]	Ni	N_L	G	
1	110	15	54,55	8,25	8,0
2	110	13,5	49,09	7,95	
3	110	13	47,27	7,84	
ZAC-300°C					
Línea	L [μm]	Ni	N_L	G	
1	280	4,5	16,07	4,73	5,1
2	280	5	17,86	5,03	
3	280	6	21,43	5,56	
Cordón-500°C					

Línea	L [μm]	N _i	N _L	G	
1	110	14	50,91	8,05	7,9
2	110	13	47,27	7,84	
3	110	13	47,27	7,84	
ZAC-500°C					
Línea	L [μm]	N _i	N _L	G	
1	280	6	21,43	5,56	5,8
2	280	6,5	23,21	5,79	
3	280	7	25	6	

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

Tabla 29-3. Tamaño de grano- Acero ASTM A572 Gr.50

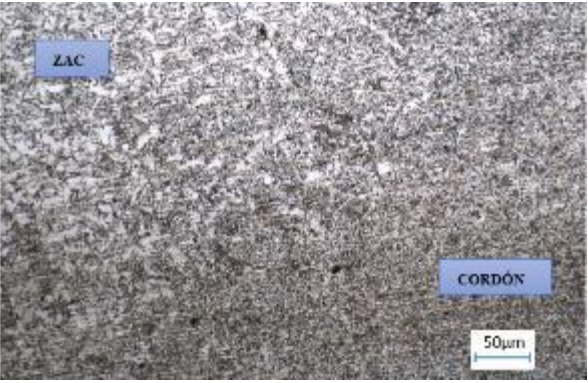

ASTM A572 Gr.50					
Cordón-SP					
Línea	L [μm]	N _i	N _L	G	
1	110	18,5	67,27	8,86	9,0
2	110	19	69,09	8,93	
3	110	21	76,36	9,22	
ZAC-SP					
Línea	L [μm]	N _i	N _L	G	
1	280	4	14,29	4,39	4,6
2	280	5	17,86	5,03	
3	280	4	14,29	4,39	
Metal Base-SP					
Línea	L [μm]	N _i	N _L	G	
1	110	19,5	70,909	9,008	9
2	110	21	76,364	9,222	
3	110	18	65,455	8,777	
Cordón-115°C					
Línea	L [μm]	N _i	N _L	G	
1	110	19,5	70,91	9,01	8,9
2	110	18,5	67,27	8,86	
3	110	19	69,09	8,93	
ZAC-115°C					
Línea	L [μm]	N _i	N _L	G	
1	280	3,5	12,500	4,000	4
2	280	4	14,286	4,385	
3	280	3	10,714	3,555	
Cordón-300°C					

Línea	L μm	Ni	NL	G	
1	110	18,5	67,27	8,86	9
2	110	20	72,73	9,08	
3	110	19	69,09	8,93	
ZAC-300°C					
Línea	L [μm]	Ni	NL	G	
1	280	5	17,86	5,03	5,6
2	280	6,5	23,21	5,79	
3	280	7	25	6	
Cordón-500°C					
Línea	L [μm]	Ni	NL	G	
1	110	15	54,55	8,25	8,1
2	110	13,5	49,09	7,95	
3	110	14	50,91	8,05	
ZAC-500°C					
Línea	L [μm]	Ni	NL	G	
1	280	9	32,143	6,725	6,3
2	280	8	28,571	6,385	
3	280	6,5	23,214	5,786	

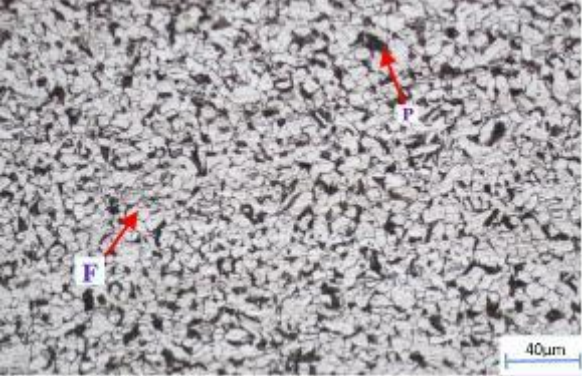
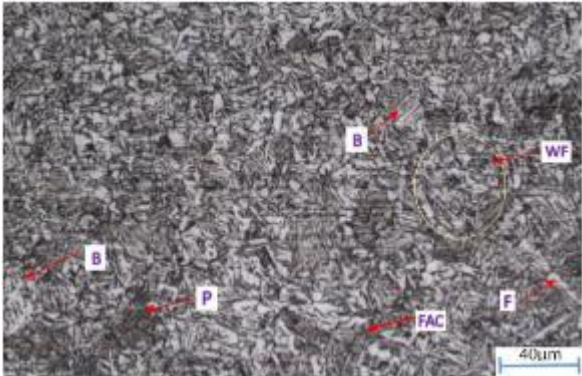
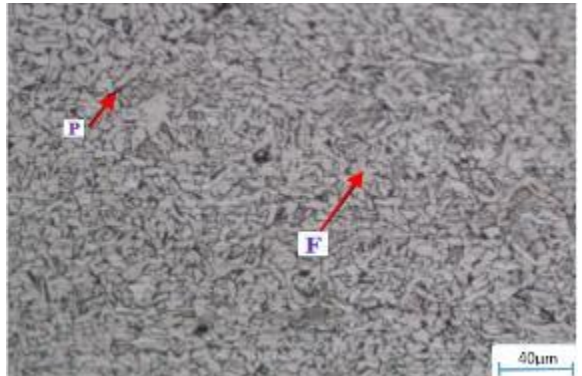
Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

3.5.2. Microestructura de juntas soldadas acero ASTM A36

3.5.2.1. Microestructuras de junta soldada sin precalentamiento- acero ASTM A36

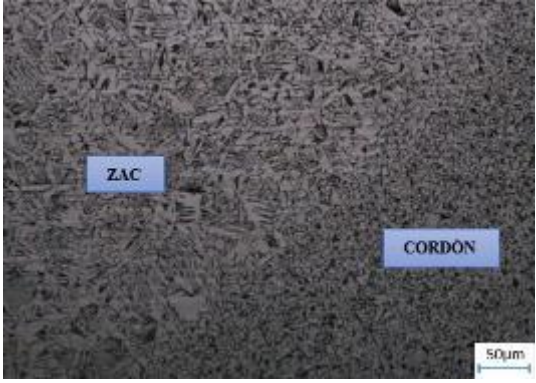
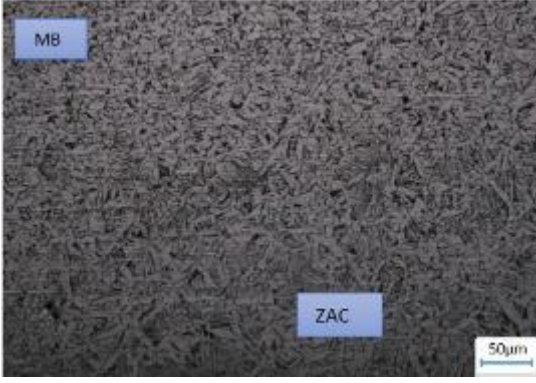
Metal Base: ASTM A36	Material de Aporte E6011	Temperatura de precalentamiento: -
Resultados		
	<p>Fig. 1 Acero ASTM A36 de 6mm. Sin precalentamiento. Se observa los cambios de zona desde el cordón de soldadura hacia la ZAC. Ampliación a 40x.</p>	
	<p>Fig. 2 Acero ASTM A36 de 6mm. Sin precalentamiento. Se observa los cambios de zona desde la ZAC hacia el metal base. Ampliación a 40x.</p>	
<p>Observaciones</p> <p>Las micrografías de la figura 1 y 2 fueron tomadas a una ampliación de 40x, en las mismas se nota los cambios de las diferentes zonas de la soldadura. Se observa un cambio notable en el tamaño de grano desde el cordón que tiene un tamaño de grano ASTM de 7,8 hacia la ZAC que posee un tamaño de grano ASTM de 3,9. Por otro lado se observa que el tamaño del grano se reduce desde la ZAC al metal base (MB) que posee un tamaño de grano ASTM de 6,8.</p>		

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

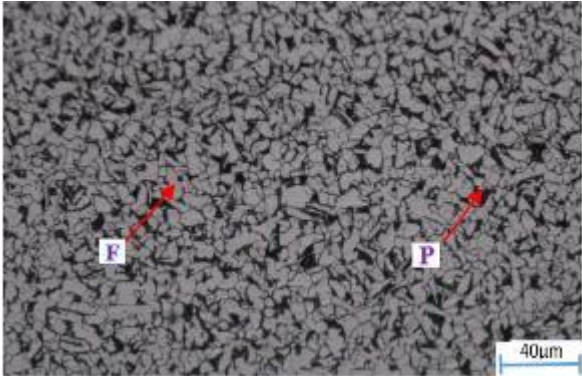
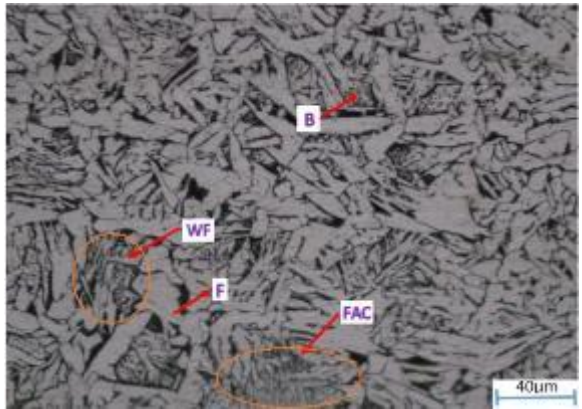
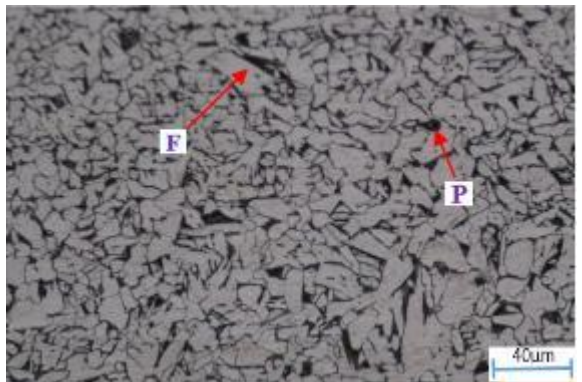
Metal Base: ASTM A36	Material de Aporte E6011	Temperatura de precalentamiento: -
Resultados		
	<p>Fig. 1 Acero ASTM A36 de 6mm. Sin precalentamiento. Micrografía del cordón de soldadura a 100x. Se observa una matriz ferrítica (región clara) con presencia de perlita (zonas oscuras).</p>	
	<p>Fig. 2 Acero ASTM A36 de 6mm. Sin precalentamiento. Micrografía de la ZAC a 100x. Se observa un microestructura compuesta por ferrita en el límite de grano, ferrita Widmanstatten y también se observa la presencia de ferrita acicular en la parte baja de la micrografía, adicionalmente se determina la presencia de listones de Bainita. Micrografía tomada a 1mm desde el límite de fusión de soldadura.</p>	
	<p>Fig. 3 Acero ASTM A36 de 6mm. Sin precalentamiento. Micrografía del metal base a 100x. Identificación de Ferrita (F-zonas claras) y perlita (P-zonas oscuras), propios de aceros de contenido bajo de carbono (0,29%C)</p>	

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

3.5.2.2. Microestructuras de junta soldada, temperatura de precalentamiento 115°C- acero ASTM A36



Metal Base: ASTM A36	Material de Aporte E6011	Temperatura de precalentamiento: 115°C
Resultados		
	<p>Fig. 1 Acero ASTM A36 de 6mm. Precalentamiento 115°C. Se observa los cambios de zona desde el cordón de soldadura hacia la ZAC. Ampliación a 40x.</p>	
	<p>Fig. 2 Acero ASTM A36 de 6mm. Precalentamiento 115°C. Se observa los cambios de zona desde la ZAC hacia el metal base. Ampliación a 40x.</p>	
<p>Observaciones Las micrografías de la figura 1 y 2 fueron tomadas a una ampliación de 40x, en las mismas se nota los cambios de las diferentes zonas de la soldadura. Se observa un cambio microestructural y también un cambio en el tamaño de grano desde el cordón que tiene un tamaño de grano de 6,8 hacia la ZAC que posee un tamaño de grano de 4,5; siendo el tamaño de grano de la ZAC muy grande en relación al cordón y el metal base. Mientras que, que el tamaño del grano se reduce desde la ZAC al metal base (MB) que posee un tamaño de grano de 6,8.</p>		

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

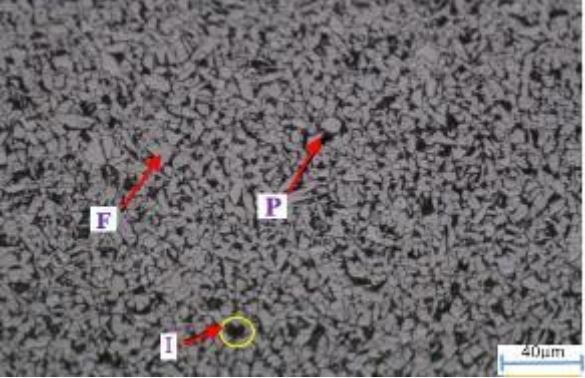
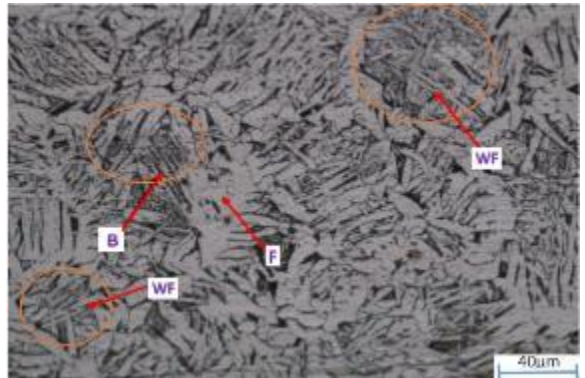
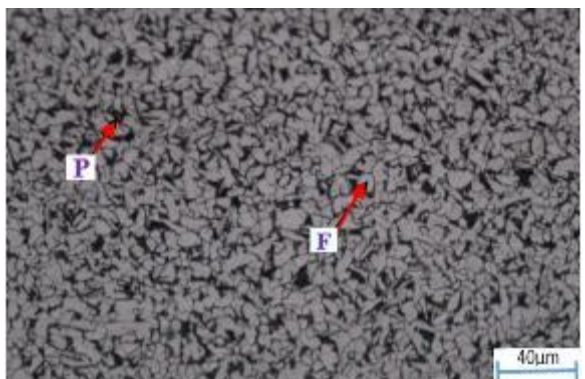
Metal Base: ASTM A36	Material de Aporte E6011	Temperatura de precalentamiento: 115°C
Resultados		
 <p>A micrograph showing the weld bead microstructure. Two red arrows point to light-colored regions labeled 'F' (ferrite) and dark-colored regions labeled 'P' (pearlite). A scale bar in the bottom right corner indicates 40µm.</p>	<p>Fig. 1 Acero ASTM A36 de 6mm. Precalentamiento 115°C. Micrografía del cordón de soldadura a 100x. Identificación de una matriz ferrítica (F- región clara) también se encuentran zonas con presencia de perlita (P- zonas oscuras).</p>	
 <p>A micrograph of the heat-affected zone (ZAC). Red arrows point to various microstructural features: 'B' (bainite), 'WF' (Widmanstätten ferrite), 'F' (ferrite), and 'FAC' (bainite lath). A scale bar in the bottom right corner indicates 40µm.</p>	<p>Fig. 2 Acero ASTM A36 de 6mm. Precalentamiento 115°C. Micrografía de la Zona afectada por el calor (ZAC). Se identifica ferrita acicular en la parte inferior de la micrografía, propia de estas zonas afectadas por las temperaturas pico alcanzadas en el proceso de soldadura. Se identifica la presencia de ferrita Widmanstatten. Adicionalmente, se observa que existen listones de Bainita. Micrografía tomada a 1mm desde el límite de fusión de soldadura.</p>	
 <p>A micrograph of the base metal. Two red arrows point to light-colored regions labeled 'F' (ferrite) and dark-colored regions labeled 'P' (pearlite). A scale bar in the bottom right corner indicates 40µm.</p>	<p>Fig. 3 Acero ASTM A36 de 6mm. Precalentamiento 115°C. Micrografía del metal base a 100x. Identificación de Ferrita (F-zonas claras) y perlita (P-zonas oscuras), propios de aceros hipoeutectoides (0,29%C).</p>	

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

3.5.2.3. Microestructuras de junta soldada, temperatura de precalentamiento 300°C- acero ASTM A36



Metal Base: ASTM A36	Material de Aporte E6011	Temperatura de precalentamiento: 300°C
Resultados		
	<p>Fig. 1 Acero ASTM A36 de 6mm. Precalentamiento de 300°C. Se observa los cambios de zona desde el cordón de soldadura hacia la ZAC. Ampliación a 40x.</p>	
	<p>Fig. 2 Acero ASTM A36 de 6mm. Precalentamiento 300°C. Se observa los cambios de zona desde la ZAC hacia el metal base. Ampliación a 40x.</p>	
<p>Observaciones Las micrografías de la figura 1 y 2 fueron tomadas a una ampliación de 40x, en las mismas se nota los cambios de las diferentes zonas de la soldadura. Se observa un cambio notable en el tamaño de grano desde el cordón que tiene un tamaño de grano de 8 hacia la ZAC que posee un tamaño de grano de 5,1. Por otro lado se observa que el tamaño del grano se reduce desde la ZAC al metal base (MB) que posee un tamaño de grano de 6,8.</p>		

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

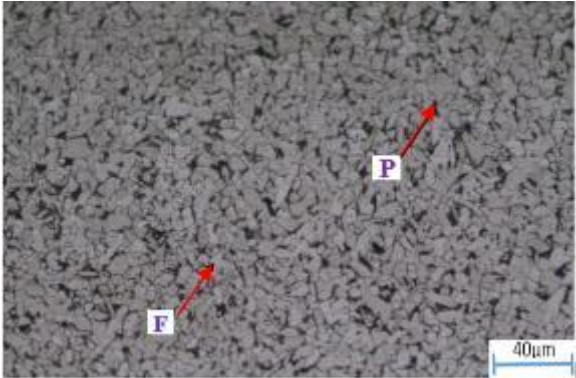
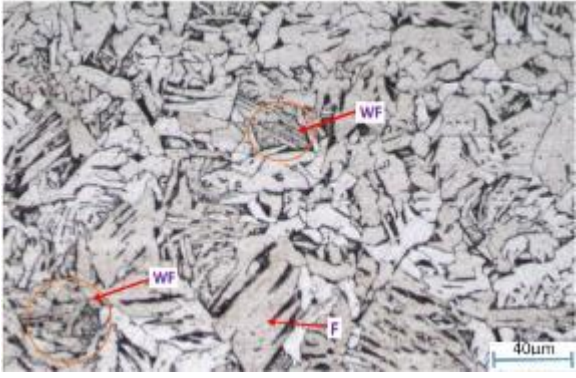
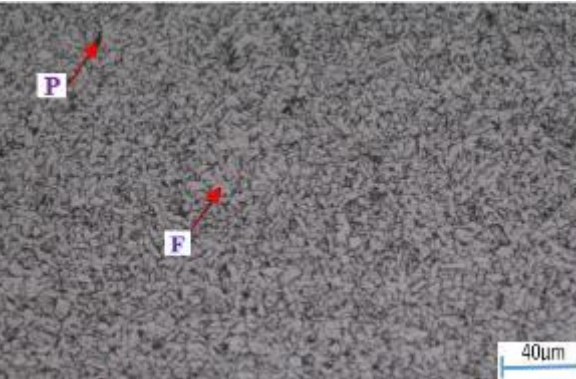
Metal Base: ASTM A36	Material de Aporte E6011	Temperatura de precalentamiento: 300°C
Resultados		
	<p>Fig. 1 Acero ASTM A36 de 6mm. Precalentamiento de 300°C. Micrografía del cordón de soldadura a 100x. Identificación de una matriz ferrítica (F- región clara) también se encuentran zonas con presencia de perlita (P- zonas oscuras). También se observa la presencia de inclusiones.</p>	
	<p>Fig. 2 Acero ASTM A36 de 6mm. Precalentamiento de 300°C. Micrografía de la Zona afectada por el calor (ZAC). Se observa la presencia predominante de ferrita Widmanstatten la misma que se presenta en forma de agujas y se observa la presencia de ferrita en los límites de grano. Además se observa la presencia de listones de Bainita. Micrografía tomada a 1mm desde el límite de fusión de soldadura.</p>	
	<p>Fig. 3 Acero ASTM A36 de 6mm. Precalentamiento de 300°C. Micrografía del metal base a 100x. Identificación de Ferrita (F-zonas claras) y perlita (P- zonas oscuras), propios de aceros de bajo contenido de carbono (0,29%C).</p>	

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

3.5.2.4. Microestructuras de junta soldada, temperatura de precalentamiento 500°C- acero ASTM A36

Metal Base: ASTM A36	Material de Aporte E6011	Temperatura de precalentamiento: 500°C
Resultados		
	<p>Fig. 1 Acero ASTM A36 de 6mm. Precalentamiento de 500°C. Se observa los cambios de zona desde el cordón de soldadura hacia la ZAC. Ampliación a 40x.</p>	
	<p>Fig. 2 Acero ASTM A36 de 6mm. Precalentamiento de 500°C. Se observa los cambios de zona desde la ZAC hacia el metal base. Ampliación a 40x.</p>	
<p>Observaciones</p> <p>Las micrografías de la figura 1 y 2 fueron tomadas a una ampliación de 40x, en las mismas se nota los cambios de las diferentes zonas de la soldadura. El cambio microestructural y en el tamaño de grano desde el cordón que tiene un tamaño de grano de 7,9 hacia la ZAC que posee un tamaño de grano de 5,8. Por otro lado se observa que el tamaño del grano se reduce desde la ZAC al metal base (MB) que posee un tamaño de grano de 6,8.</p>		

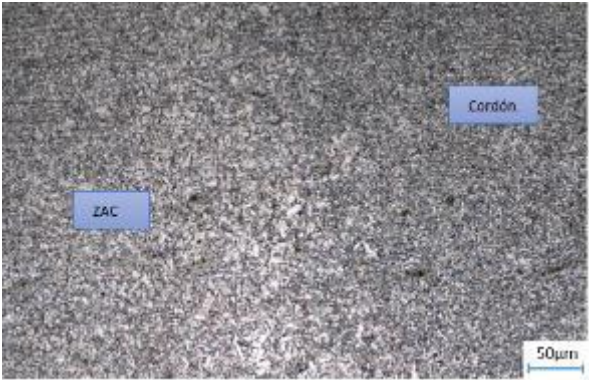

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

Metal Base: ASTM A36	Material de Aporte E6011	Temperatura de precalentamiento: 500°C
Resultados		
	<p>Fig. 1 Acero ASTM A36 de 6mm. Precalentamiento de 500°C. Micrografía del cordón de soldadura a 100x. Identificación en gran parte de ferrita (F- región clara) también se encuentran zonas con presencia de perlita (P- zonas oscuras).</p>	
	<p>Fig. 2 Acero ASTM A36 de 6mm. Precalentamiento de 500°C. Micrografía de la zona afectada por el calor a una ampliación de 100x. Identificación de ferrita en forma de placas en los límites de grano. Adicionalmente, se determina la presencia de ferrita Widmanstatten en menores cantidades, comparada con las micrografías anteriores. Micrografía tomada a 1mm desde el límite de fusión de soldadura.</p>	
	<p>Fig. 3 Acero ASTM A36 de 6mm. Precalentamiento de 500°C. Micrografía del metal base a 100x. Identificación de Ferrita (F-zonas claras) y perlita (P- zonas oscuras), propios de aceros de bajo contenido de carbono (0,29%C).</p>	

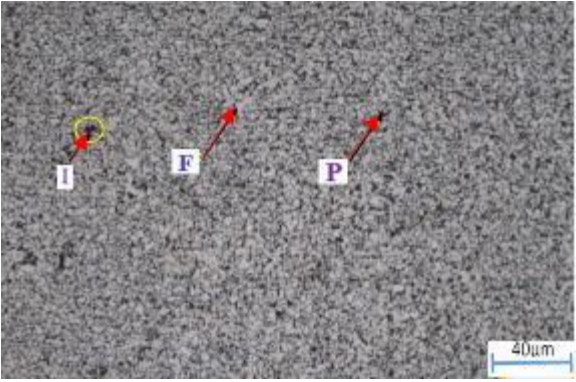
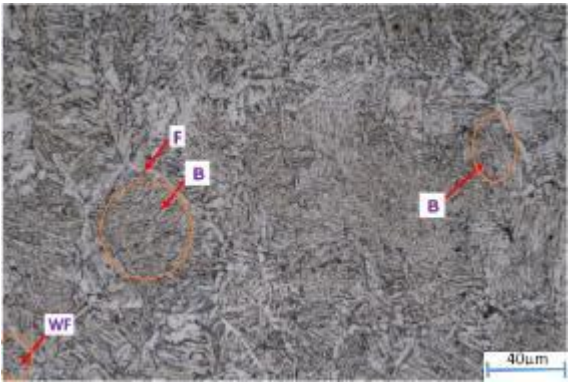
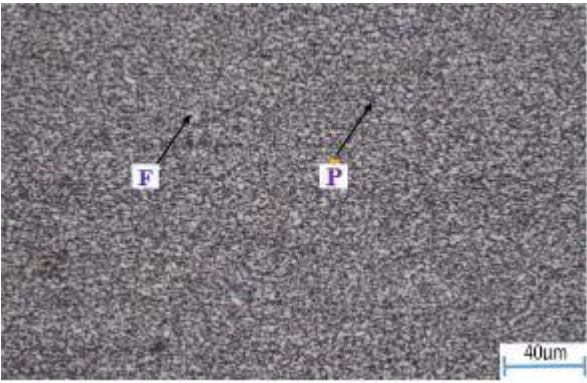
Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

3.5.3. Microestructura de juntas soldadas acero ASTM A572 Gr.50.

3.5.3.1. Microestructuras de junta soldada sin precalentamiento- acero ASTM A572 Gr.50



Metal Base: ASTM A572 Gr.50	Material de Aporte E6011	Temperatura de precalentamiento: -
Resultados		
		<p>Fig. 1 Acero ASTM A572 Gr.50 de 4mm. Sin precalentamiento. Se observa los cambios de zona desde el cordón de soldadura hacia la ZAC. Ampliación a 40x.</p>
		<p>Fig. 2 Acero ASTM A572 Gr.50 de 4mm. Sin precalentamiento. Se observa los cambios de zona desde la ZAC hacia el metal base. Ampliación a 40x.</p>
<p>Observaciones</p> <p>Las micrografías de la figura 1 y 2 fueron tomadas a una ampliación de 40x, en las mismas se nota los cambios de las diferentes zonas de la soldadura. Se observa el cambio microestructural y en el tamaño de grano desde el cordón que tiene un tamaño de grano de 9 hacia la ZAC que posee un tamaño de grano de 4,6. Por otro lado se observa que el tamaño del grano se reduce desde la ZAC al metal base (MB) que posee un tamaño de grano de 9. También se observa la presencia de inclusiones.</p>		

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

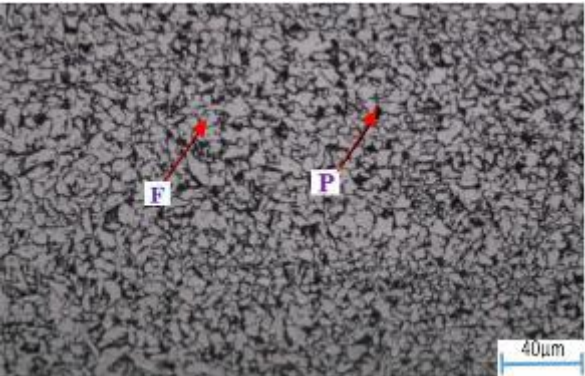
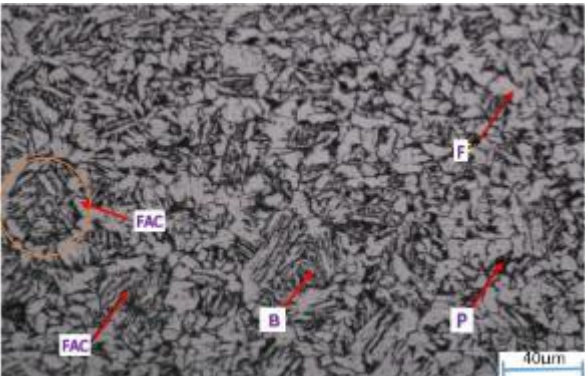
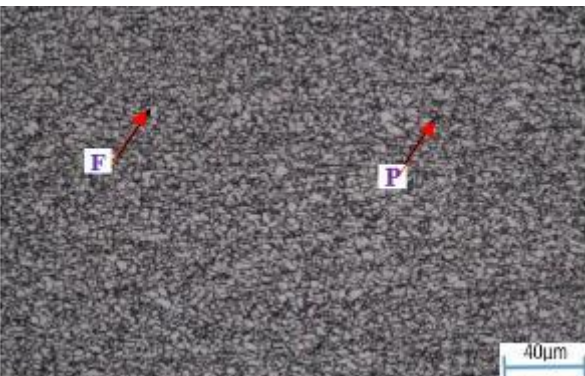
Metal Base: ASTM A572 Gr.50	Material de Aporte E6011	Temperatura de precalentamiento: -
Resultados		
	<p>Fig. 1 Acero ASTM A572 Gr.50 de 4mm. Sin precalentamiento. Microestructura del cordón de soldadura a 100x. Se identifica una matriz ferrítica (F- zonas claras) con presencia de perlita (P- zonas oscuras). De igual se observa la presencia de inclusiones.</p>	
	<p>Fig. 2 Acero ASTM A572 Gr.50 de 4mm. Sin precalentamiento. Micrografía de la zona afectada térmicamente a 100x. Se identifica la presencia formación de ferrita Widmanstatten y la presencia de ferrita en los límites de grano. Adicionalmente, se identifica la presencia de listones de Bainita en toda la microestructura. Micrografía tomada a 1mm desde el límite de fusión de soldadura.</p>	
	<p>Fig. 3 Acero ASTM A572 Gr.50 de 4mm. Sin precalentamiento. Micrografía del metal base a 100x. Identificación de Ferrita (F-zonas claras) y perlita (P- zonas oscuras), propios de aceros de bajo contenido de carbono (0,23%C).</p>	

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

3.5.3.2. Microestructuras de junta soldada, temperatura de precalentamiento de 115°C- acero ASTM A572 Gr.50



Metal Base: ASTM A572 Gr.50	Material de Aporte E6011	Temperatura de precalentamiento: 115°C
Resultados		
	<p>Fig. 1 Acero ASTM A572 Gr.50 de 4mm. Precalentamiento 115°C. Se observa los cambios de zona desde el cordón de soldadura hacia la ZAC. Ampliación a 40x.</p>	
	<p>Fig. 2 Acero ASTM A572 Gr.50 de 4mm. Precalentamiento 115°C. Se observa los cambios de zona desde la ZAC hacia el metal base. Ampliación a 40x.</p>	
<p>Observaciones Las micrografías de la figura 1 y 2 fueron tomadas a una ampliación de 40x, en las mismas se nota los cambios de las diferentes zonas de la soldadura. Se observa el cambio microestructural y en el tamaño de grano desde el cordón que tiene un tamaño de grano de 8,9 hacia la ZAC que posee un tamaño de grano de 4. Por otro lado se observa que el tamaño del grano se reduce desde la ZAC al metal base (MB) que posee un tamaño de grano de 8,9.</p>		

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

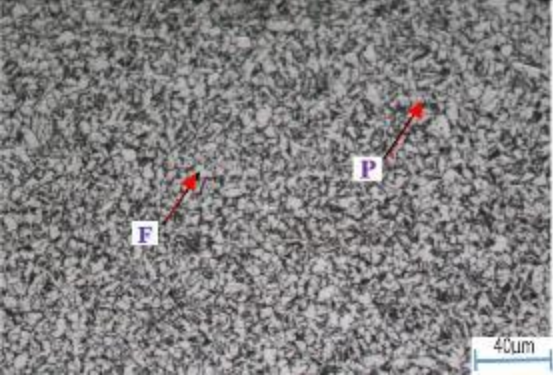
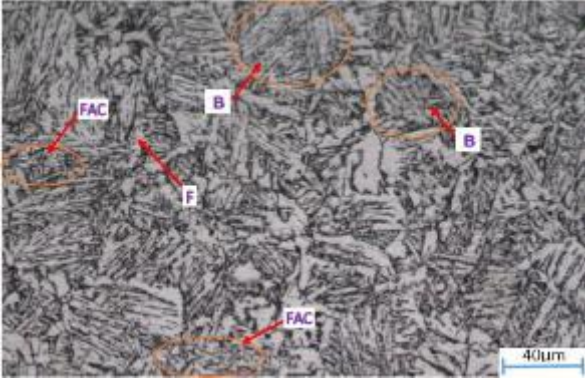
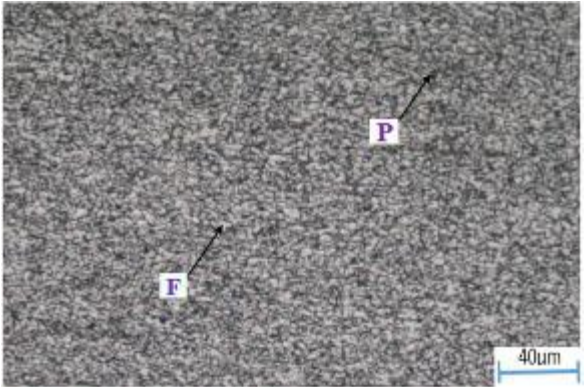
Metal Base: ASTM A572 Gr.50	Material de Aporte E6011	Temperatura de precalentamiento: 115°C
Resultados		
	<p>Fig. 1 Acero ASTM A572 Gr.50 de 4mm. Precalentamiento 115°C. Microestructura del cordón de soldadura a 100x. Se identifica una matriz ferrítica (F- zonas claras) con presencia de perlita (P- zonas oscuras).</p>	
	<p>Fig. 2 Acero ASTM A572 Gr.50 de 4mm. Precalentamiento 115°C. Micrografía de la zona afectada térmicamente a 100x. Se identifica la presencia de ferrita acicular, en gran parte de la micrografía, también se observa la presencia de ferrita y perlita. Adicionalmente, se observa la presencia de Bainita y la presencia de placas de ferrita en los límites de grano.</p>	
	<p>Fig. 3 Acero ASTM A572 Gr.50 de 4mm. Precalentamiento 115°C. Micrografía del metal base a 100x. Identificación de Ferrita (F-zonas claras) y perlita (P- zonas oscuras), propios de aceros hipoeutectoides.</p>	

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

3.5.3.3. Microestructuras de junta soldada, temperatura de precalentamiento de 300°C- acero ASTM A572 Gr.50

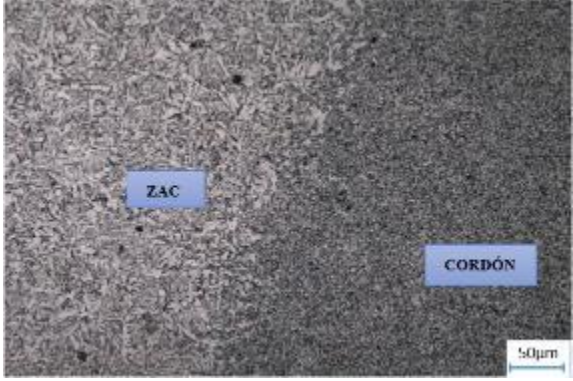

Metal Base: ASTM A572 Gr.50	Material de Aporte E6011	Temperatura de precalentamiento: 300°C
Resultados		
	<p>Fig. 1 Acero ASTM A572 Gr.50 de 4mm. Precalentamiento de 300°C. Se observa los cambios de zona desde el cordón de soldadura hacia la ZAC. Ampliación a 40x.</p>	
	<p>Fig. 2 Acero ASTM A572 Gr.50 de 4mm. Precalentamiento 300°C. Se observa los cambios de zona desde la ZAC hacia el metal base. Ampliación a 40x.</p>	
<p>Observaciones Las micrografías de la figura 1 y 2 fueron tomadas a una ampliación de 40x, en las mismas se nota los cambios de las diferentes zonas de la soldadura. El cambio microestructural y en el tamaño de grano desde el cordón que tiene un tamaño de grano de 9 hacia la ZAC que posee un tamaño de grano de 5,6. Por otro lado se observa que el tamaño del grano se reduce desde la ZAC al metal base (MB) que posee un tamaño de grano de 9.</p>		

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

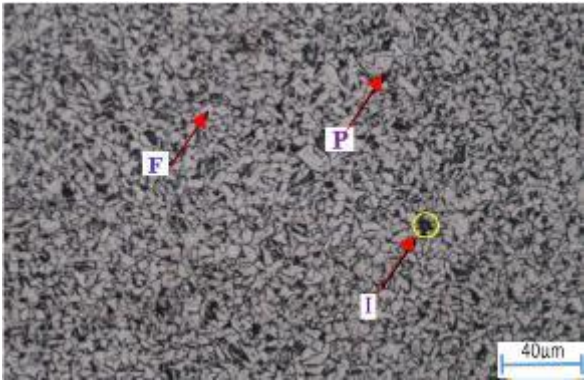
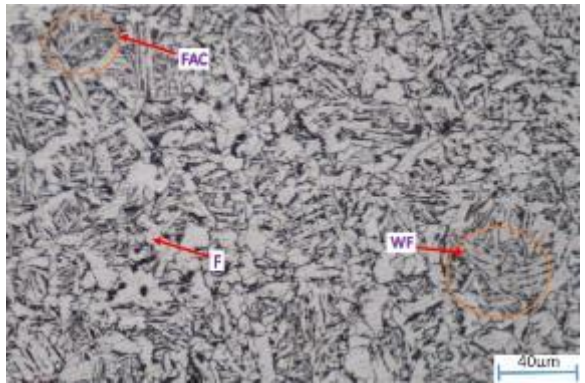
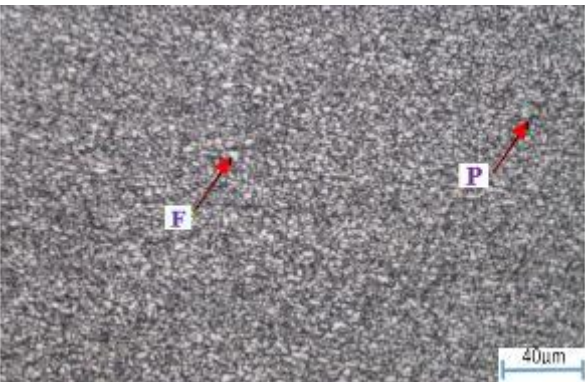
Metal Base: ASTM A572 Gr.50	Material de Aporte E6011	Temperatura de precalentamiento: 300°C
Resultados		
	<p>Fig. 1 Acero ASTM A572 Gr.50 de 4mm. Precalentamiento de 300°C. Cordón a 100x. Se identifica una matriz ferrítica (F- zonas claras) con presencia de perlita (P- zonas oscuras).</p>	
	<p>Fig. 2 Acero ASTM A572 Gr.50 de 4mm. Precalentamiento de 300°C. Micrografía de la zona afectada térmicamente a 100x. Se observa ferrita acicular en dos zonas. Se identifica la formación de placas laterales de ferrita. Adicionalmente, se identifica la presencia de Bainita pero en menor cantidad en relación a las micrografías anteriores. Y se identifica la ferrita en los límites de grano. Micrografía tomada a 1mm desde el límite de fusión de soldadura.</p>	
	<p>Fig. 3 Acero ASTM A572 Gr.50 de 4mm. Precalentamiento de 300°C. Micrografía del metal base a 100x. Identificación de Ferrita (F-zonas claras) y perlita (P- zonas oscuras), propios de aceros de bajo contenido de carbono (0,23%C).</p>	

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

3.5.3.4. Microestructuras de junta soldada, temperatura de precalentamiento de 500°C- acero ASTM A572 Gr.50

Metal Base: ASTM A572 Gr.50	Material de Aporte E6011	Temperatura de precalentamiento: 500°C
Resultados		
	<p>Fig. 1 Acero ASTM A572 Gr.50 de 4mm. Pre calentamiento de 500°C. Se observa los cambios de zona desde el cordón de soldadura hacia la ZAC. Ampliación a 40x.</p>	
	<p>Fig. 2 Acero ASTM A572 Gr.50 de 4mm. Pre calentamiento de 500°C. Se observa los cambios de zona desde la ZAC hacia el metal base. Ampliación a 40x.</p>	
<p>Observaciones Las microfotografías de la figura 1 y 2 fueron tomadas a una ampliación de 40x, en las mismas se nota los cambios de las diferentes zonas de la soldadura. Se observa el cambio microestructural y en el tamaño de grano desde el cordón que tiene un tamaño de grano de 8,1 hacia la ZAC que posee un tamaño de grano de 6,3. Por otro lado se observa que el tamaño del grano se reduce desde la ZAC al metal base (MB) que posee un tamaño de grano de 9.</p>		

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

Metal Base: ASTM A72 Gr.50	Material de Aporte E6011	Temperatura de precalentamiento: 500°C
Resultados		
	<p>Fig. 1 Acero ASTM A572 Gr.50 de 4mm. Precalentamiento de 500°C. Cordón a 100x. Se identifica una matriz ferrítica (F- zonas claras) con presencia de perlita (P- zonas oscuras). Adicionalmente, se observa la presencia de inclusiones.</p>	
	<p>Fig. 2 Acero ASTM A572 Gr.50 de 4mm. Precalentamiento de 500°C. Micrografía de la zona afectada térmicamente a 100x. Se observa ferrita acicular y Widmanstatten en dos zonas pequeñas de la micrografía. Se identifica una matriz de placas laterales de ferrita y un grano ferrítico mas equiaxial en comparación con las anteriores micrografías. No se idéntica presencia de Bainita. Micrografía tomada a 1mm desde el límite de fusión de soldadura.</p>	
	<p>Fig. 3 Acero ASTM A572 Gr.50 de 4mm Precalentamiento de 500°C. Micrografía del metal base a 100x. Identificación de Ferrita (F-zonas claras) y perlita (P- zonas oscuras), propios de aceros de bajo contenido de carbono (0,23%C).</p>	

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

3.5.4. Interpretación de análisis metalográfico

3.5.4.1. Juntas soldadas de acero ASTM A36

En la zona del cordón de soldadura se observa una microestructura ferrítica (zonas claras), también se encuentran zonas con presencia de perlita (zonas oscuras). En la junta soldada sin precalentamiento y con precalentamiento de 115°C se observa mayor presencia de zonas con presencia de Bainita al comparar las microestructuras a temperaturas de 300°C y 500°C. Además, en la junta soldada sin precalentamiento se observa la presencia de inclusiones, que son propias del material debido a su proceso de manufactura.

En la zona afectada por el calor ZAC de la junta sin precalentamiento que es la más cercana a la línea de fusión, se pudo determinar que en la junta sin precalentamiento la microestructura es de tipo ferrita Widmanstatten y zonas con ferrita acicular y la presencia de ferrita en los límites de grano. Adicionalmente se observa la presencia de Bainita en varias zonas de la micrografía.

Al comparar la microestructura obtenida teóricamente por el estudio del ciclo térmico de la soldadura para la ZAC, se logra observar que en las juntas soldadas sin precalentamiento y a 115°C, no se encuentra presencia de Martensita, como se lo obtuvo con el estudio teórico; sin embargo, si se observa presencia de pequeñas zonas con perlita. Con la junta precalentada a 300°C de igual manera no encuentra una microestructura martensítica, si se idéntica la presencia de ferrita, Bainita y perlita. Con la temperatura de precalentamiento de 500°C teóricamente se obtiene una microestructura compuesta por ferrita, perlita y Bainita, las mismas coinciden con lo encontrada experimentalmente a excepción de la Bainita que en este caso no se encuentra, lo que si se determina es la formación de placas laterales de ferrita. Cabe recalcar, que el diagrama CCT empleado para el estudio del ciclo térmico y la velocidad de enfriamiento de cada soldadura corresponde a un acero con composición química muy similar a la del acero ASTM A36.

El metal base se observa una microestructura ferrítica (zonas claras), también se encuentran zonas con presencia de perlita (zonas oscuras). En todas las juntas soldadas se observa que la microestructura es similar y que el tamaño de grano ASTM es relativamente el mismo en todas las microestructuras ya que esta zona tanto en el precalentamiento como en las temperaturas pico alcanzadas en el metal base no superan la temperaturas A_{c3} , para que exista algún tipo de cambio en la microestructura. Por otro lado, la disminución del tamaño de grano se da debido a que en

esta zona las temperaturas pico del ciclo térmico son más bajas en relación a las de la zona de fusión.

En la siguiente tabla se observa una comparación de los tamaños de grano en cada zona de la soldadura de todas las juntas.

Tabla 30-3: Comparación entre tamaño de grano de juntas soldadas ASTM A36

		Tamaño de grano
Cordón de soldadura	Sin precalentamiento	7,8
	115°C	6,8
	300 °C	8
	500 °C	7,9
ZAC	Sin precalentamiento	3,9
	115°C	4,5
	300 °C	5,1
	500 °C	5,8
Metal base	Sin precalentamiento	6,8
	115°C	
	300 °C	
	500 °C	

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

3.5.4.2. Juntas soldadas de acero ASTM A572 Gr.50

En la zona del cordón de soldadura se observa una microestructura ferrítica (zonas claras) también se encuentran zonas con presencia de perlita (zonas oscuras). En la junta soldada sin precalentamiento y con precalentamiento de 500°C se observa la presencia de inclusiones.

En la zona afectada por el calor ZAC que se encuentra cerca de la zona de fusión del metal base con el material de aporte se ve afectada por el ciclo térmico y las altas temperaturas que el mismo alcanza. En esta zona se logra identificar, en la junta soldada sin precalentamiento la formación de ferrita aliotromorfica en los límites de grano y la presencia de Bainita en zonas muy marcadas. Adicionalmente se identifica la presencia de ferrita Widmanstatten. En la junta soldada a 115 °C se identifica la presencia de ferrita acicular, en gran parte de la micrografía, también se observa

la presencia de perlita. Adicionalmente, se observa la presencia de Bainita y la presencia de placas de ferrita en los límites de grano. En la junta soldada a 300 °C se observa ferrita acicular en dos zonas. La micrografía está compuesta de placas laterales de ferrita y ferrita en los límites de grano. Adicionalmente, se identifica la presencia de Bainita pero en menor cantidad en relación a las micrografías anteriores. En la junta soldada a 300 °C, en esta microestructura se observa la presencia de ferrita en forma de placas laterales, no se determina la presencia de Bainita. En esta microestructura el grano ferrítico es más equiaxial en comparación con la junta soldada a 300 °C, adicionalmente se observa la presencia de zonas con más perlita. Microestructuras como la ferrita acicular y Widmanstatten son propias de estas zonas en soldaduras de aceros al carbono.

El metal base se observa una microestructura ferrítica (zonas claras), también se encuentran zonas con presencia de perlita (zonas oscuras), propios de aceros hipoeutectoides. En todas las juntas soldadas se observa que la microestructura es similar y que el tamaño de grano ASTM es relativamente el mismo en todas las microestructuras ya que esta zona tanto en el precalentamiento como en las temperaturas pico alcanzadas en el metal base no superan la temperaturas A_{c3} , para que exista algún tipo de cambio en la microestructura. El tamaño de grano decrece en esta zona debido a que las temperaturas a las que está sometido no son tan altas en comparación con las de zonas cercanas al arco eléctrico.

Para este acero no se logró realizar el estudio teórico de las microestructuras debido a que no se cuenta con un diagrama CCT que posea una composición química similar a la del acero A572 Gr.50.

En la siguiente tabla se observa una comparación de los tamaños de grano en cada zona de la soldadura de todas las juntas.

Tabla 31-3: Comparación entre tamaño de grano de juntas soldadas ASTM A572 Gr 50.

		Tamaño de grano
Cordón de soldadura	Sin precalentamiento	9
	115°C	8,9
	300 °C	9
	500 °C	8,1
ZAC	Sin precalentamiento	4,6
	115°C	4
	300 °C	5,6
	500 °C	6,3
Metal base	Sin precalentamiento	9
	115°C	
	300 °C	
	500 °C	

3.6. Ensayos mecánicos en juntas soldadas

3.6.1. Ensayo de Microdureza

Se realizó mediciones cada 4mm desde el cordón de soldadura.

En las siguientes tablas se observa los diferentes valores de dureza calculados mediante la ecuación 25. En los gráficos 9-3 y 10-3 se observan los perfiles de durezas obtenidos.

Tabla 32-3: Dureza Vickers acero ASTM A36

Acero ASTM A36, espesor 4mm sin precalentamiento	
Distancia de indentación (mm)	Dureza (HV)
0	170
4	171
8	155
12	138
16	136

Acero ASTM A36, espesor de 4mm a 300 °C	
Distancia de indentación (mm)	Dureza (HV)
0	151
4	144
8	131
12	128
16	133

Acero ASTM A36, espesor de 4mm a 115 °C	
Distancia de indentación (mm)	Dureza (HV)
0	161
4	156
8	148
12	130
16	133

Acero ASTM A36, espesor de 4mm a 500 °C	
Distancia de indentación (mm)	Dureza (HV)
0	142
4	141
8	127
12	116
16	125

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

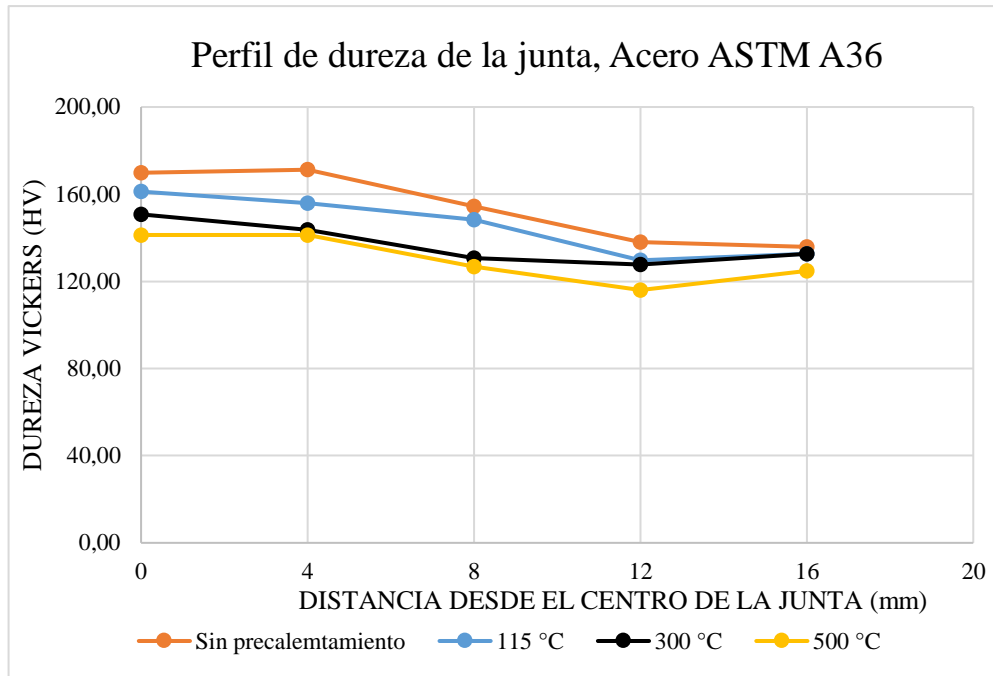


Gráfico 9-3. Perfil de durezas Acero ASTM A36.

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

Tabla 33-3: Dureza Vickers acero ASTM A572

Acero ASTM A572, espesor 4mm sin precalentamiento	
Distancia de indentación (mm)	Dureza (HV)
0	202
4	200
8	170
12	161
16	152

Acero ASTM A572, espesor de 4mm a 300 °C	
Distancia de indentación (mm)	Dureza (HV)
0	179
4	167
8	155
12	146
16	145

Acero ASTM A572, espesor de 4mm a 115 °C	
Distancia de indentación (mm)	Dureza (HV)
0	196
4	186
8	164
12	158
16	156

Acero ASTM A572, espesor de 4mm a 500 °C	
Distancia de indentación (mm)	Dureza (HV)
0	167
4	161
8	139
12	135
16	137

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

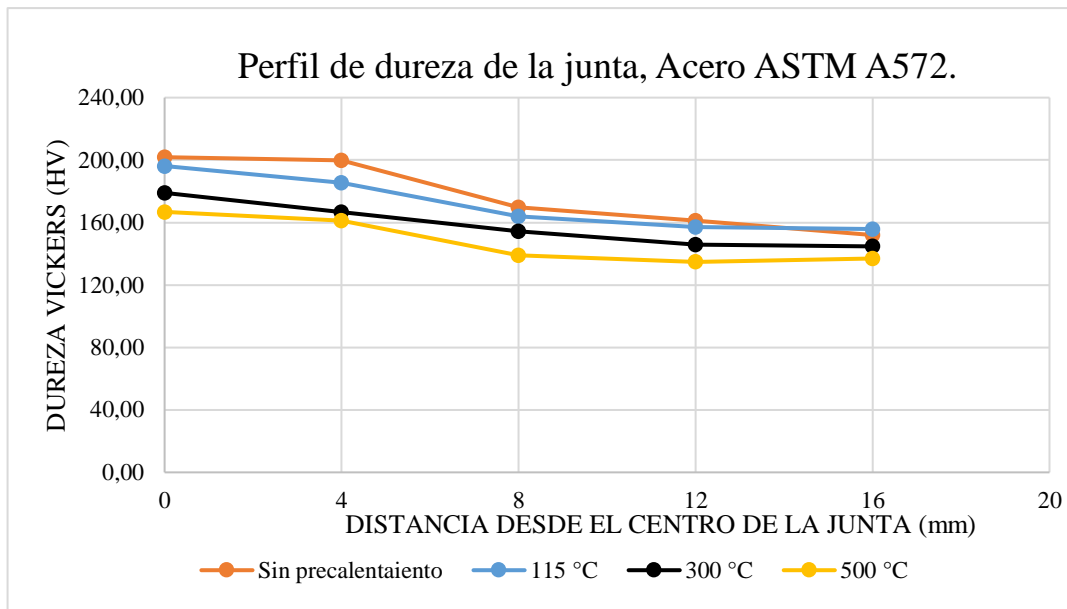


Gráfico 10-3. Perfil de durezas Acero ASTM A572 Grado 50.

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

3.6.1.1. Análisis de resultados de ensayo de Microdureza.

En esta investigación se realiza una comparación de durezas medidas en una misma distancia de indentación entre las diferentes juntas soldadas. En el grafico 3-3 se observa esta comparación de las microdurezas para el acero ASTM A36. Se logra visualizar que a medida que la temperatura de precalentamiento aumenta la microdureza disminuye.

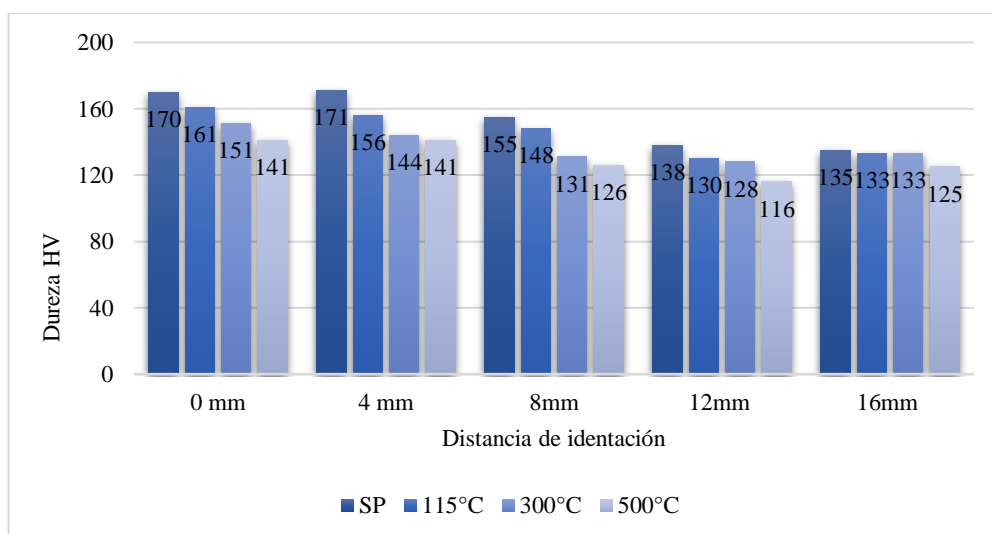


Gráfico 11-3. Comparación de Microdureza para juntas de acero ASTM A36.

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

A una distancia de 0mm, es decir en el centro del cordón de soldadura, la microdureza de la junta sin precalentamiento es de 170 HV, en comparación con la microdureza de la junta precalentamiento a 115°C que es de 161 HV; se observa una disminución de 5,3%. Realizando una comparación de microdurezas de la junta sin precalentamiento y la soldada con precalentamiento de 300°C (151 HV) esta baja en 11,2%. Mientras que para la junta precalentada a 500°C (141 HV) se observa que la microdureza baja en un 17,1% en relación a la junta sin precalentamiento. Con esto se puede decir que la junta soldada sin precalentamiento tiene más probabilidad de sufrir una fisuración en frío, en relación a las juntas soldadas con precalentamiento.

Las mediciones de microdureza tomadas a 4mm (zona del cordón de soldadura), se logra observar un comportamiento similar a las mediciones tomadas a 0mm.

En la ZAC (identación a 8mm del cordón) se observa aumento en la microdureza a medida que se aproxima al cordón de soldadura en todas las probetas; los mayores valores de microdureza los registra la probeta sin precalentamiento, esto debido a su mayor sensibilidad al efecto térmico del proceso de soldadura causado por una menor entrada de calor con mayores velocidades de enfriamiento, lo cual deriva en la formación de microestructuras un poco más duras como los listones de Bainita que se observan con más presencia en esta junta.

Las microdurezas medidas a 12mm del cordón de soldadura también sufren una disminución, esto debido a que en esta zona, aún es muy cercana a las temperaturas altas del ciclo térmico.

La microdureza medida a una distancia de 16mm que es la zona del metal base se observa que en todas las probetas (135-133 HV) a excepción de la probeta a temperatura de precalentamiento de 500°C (125 HV), la microdureza se mantiene relativamente uniforme, esto debido a que no se observó cambios a nivel microestructural de esta zona.

En el grafico 3-4 se observa una comparación de las microdureza de juntas soldadas para el acero ASTM A572. Al igual que el acero ASTM A36, en estas juntas la microdureza disminuye si se aplica un precalentamiento.

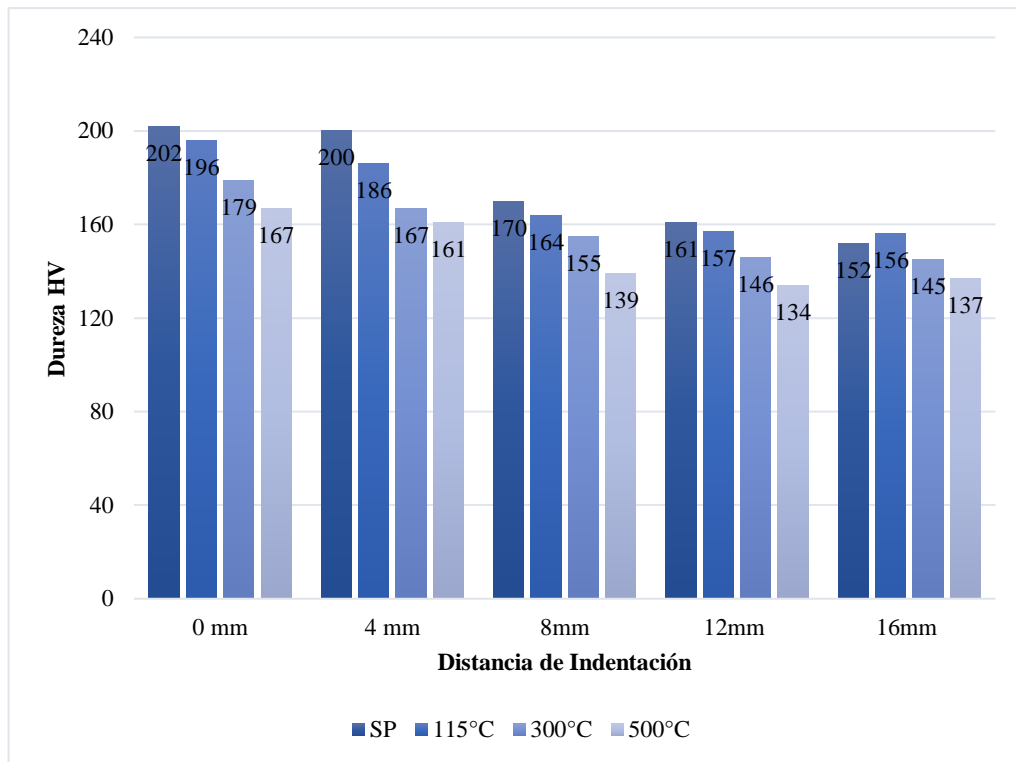


Gráfico 12-3. Comparación de Microdureza para juntas de acero ASTM A572.

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

Al medir la microdureza en el cordón de soldadura, la junta sin precalentamiento posee una microdureza de 202 HV, en comparación con la microdureza de la junta precalentamiento a 115°C que es de 196 HV; se observa una disminución de 3% que es un porcentaje relativamente bajo. En comparación con la microdureza obtenida en la junta de 300°C (179 HV) esta baja en 11,4% con relación a la obtenida sin precalentamiento (202 HV). Mientras que para la junta precalentada a 500°C (167 HV) se observa que la misma baja en un 17,3% en relación a la junta sin precalentamiento. Se observa que en la junta soldada sin precalentamiento tiene más probabilidad de sufrir un agrietamiento en frío, que en relación a las juntas soldadas con precalentamiento.

En la ZAC se observa aumento en la microdureza a medida que se aproxima al cordón de soldadura en todas las probetas; los mayores valores de microdureza HV los registra la probeta sin precalentamiento, las microdurezas medidas en la ZAC de las juntas soldadas con precalentamiento son menores, esto debido al efecto del ciclo térmico provocado por cada proceso de soldadura causado por una entrada de calor mayor con velocidades de enfriamiento más lentas, por lo cual se observa una disminución de listones de Bainita.. La junta precalentada a 500°C (139 HV) tiene un 18,2% menos microdureza que la junta sin precalentamiento (170 HV)

Las microdurezas medidas a 12mm del cordón de soldadura también experimentan una disminución esto debido a que en esta zona aún se encuentra cerca a las temperaturas altas alcanzadas en el ciclo térmico de esta zona.

La dureza medida a una distancia de 16mm que es la zona del metal base; se observa que los valores de microdureza de la probeta sin precalentamiento (152) es más baja en relación con la probeta precalentada a 115°C (156) la dureza aumenta en 2,6% , mientras que, comparando la junta sin precalentamiento con la junta soldada a 300°C la microdureza baja en 4,6% y finalmente estableciendo una comparación con la probeta soldada con precalentamiento de 500°C la microdureza baja en un porcentaje de 9,9%. Estas variaciones de dureza relativamente pequeñas se dan debido a que el metal base no experimenta cambio a nivel microestructural.

3.6.2. Ensayo de Tracción

Los datos del ensayo de tracción se observan en la tabla a continuación.

Tabla 34-3: Datos del ensayo de tracción

Lugar de Ejecución del ensayo	Laboratorio de Materiales, Centro de fomento Carrocero (Ambato)
Método de ensayo	AWS B4.0 (AWS D1.1)
Tipo de probeta	Plana
Equipo utilizado	Máquina de ensayos universal para metales Metro Test 1500 kN
Velocidad de ensayo	10 mm/min
Precarga	5000 N
Fecha de realización	2020-08-27

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

El ensayo de tracción se realiza con el fin de conocer la resistencia a la tracción de cada junta de soldadura, se elabora tres probetas de cada junta soldada tanto para la junta sin precalentamiento como para las juntas con precalentamiento.

Para la identificación de cada junta soldada se empleó la siguiente codificación que se muestra en la tabla 35-3.

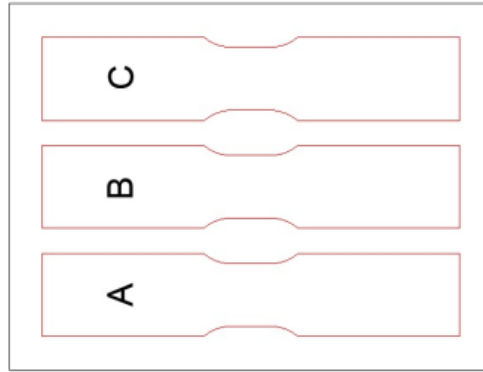


Figura 10-3. Identificación de probetas de tracción

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020


Tabla 35-3: Identificación de probetas de tracción acero ASTM A572 Gr.50


Identificación		Temperatura Pre calentamiento
A572 Gr 50	A36	
ETM 01-1 (A) ETM 01-2 (B) ETM 01-3 (C)	ETM 05-1 (A) ETM 05-2 (B) ETM 05-3 (C)	Sin pre calentamiento
ETM 02-1 (A) ETM 02-2 (B) ETM 02-3 (C)	ETM 06-1 (A) ETM 06-2 (B) ETM 06-3 (C)	115 °C
ETM 03-1 (A) ETM 03-2 (B) ETM 03-3 (C)	ETM 07-1 (A) ETM 07-2 (B) ETM 07-3 (C)	300 °C
ETM 04-1 (A) ETM 04-2 (B) ETM 04-3 (C)	ETM 08-1 (A) ETM 08-2 (B) ETM 08-3 (C)	500°C


Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

Los resultados de los ensayos de tracción correspondientes al acero ASTM A572 se observan en la tabla 36-3. Mientras que, para el acero ASTM A36 los resultados del ensayo de tracción se observan en la tabla 37-3.


Tabla 36-3: Resultados de ensayo de tracción Acero ASTM A572 Gr.50

Identificación de probeta	Fuerza Máxima (N)	Resistencia a la tracción (MPa)	Evidencia
ETM 01-1	65500,01	409,22	
ETM 01-2	70550,01	460,28	
ETM 01-3	80900,01	527,42	
Promedio \bar{X}	72316,677	465,641	
Desviación estándar S_{n-1}	7850,531	59,284	
Coefficiente de variación CV	10,86	12,73	

Identificación de probeta	Fuerza Máxima (N)	Resistencia a la tracción (MPa)	Evidencia
ETM 02-1	70200,01	458,77	
ETM 02-2	67750,01	444,14	
ETM 02-3	64500,01	416,90	
Promedio \bar{X}	67483,34	439,94	
Desviación estándar S_{n-1}	2859,341	21,248	
Coefficiente de variación CV	4,24	4,83	

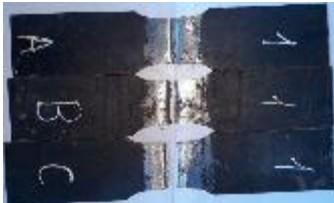
Identificación de probeta	Fuerza Máxima (N)	Resistencia a la tracción (MPa)	Evidencia
ETM 03-1	82000,01	538,43	
ETM 03-2	65550,01	431,72	
ETM 03-3	71900,01	473,87	
Promedio \bar{X}	73150,01	481,34	


Desviación estándar S_{n-1}	8295,933	53,749
Coefficiente de variación CV	11,34	11,17


Identificación de probeta	Fuerza Máxima (N)	Resistencia a la tracción (MPa)	Evidencia
ETM 04-1	77700,01	507,51	
ETM 04-2	76050,01	498,84	
ETM 04-3	68850,01	455,06	
Promedio \bar{X}	74200,01	487,138	
Desviación estándar S_{n-1}	4706,113	28,113	
Coefficiente de variación CV	6,34	5,77	


Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

Tabla 37-3: Resultados de ensayo de tracción Acero ASTM A36

Identificación de probeta	Fuerza Máxima (N)	Resistencia a la tracción (MPa)	Evidencia
ETM 05-1	96600,01	431,64	
ETM 05-2	97900,02	441,28	
ETM 05-3	92400,01	416,27	
Promedio \bar{X}	95633,347	429,732	
Desviación estándar S_{n-1}	2874,605	12,615	
Coefficiente de variación CV	3,01	2,94	

Identificación de probeta	Fuerza Máxima (N)	Resistencia a la tracción (MPa)	Evidencia
ETM 06-1	116100,02	513,05	
ETM 06-2	69550,01	311,21	
ETM 06-3	98600,01	471,43	
Promedio \bar{X}	94750,01	431,898	
Desviación estándar S_{n-1}	23512,608	106,567	
Coefficiente de variación CV	24,82	24,67	

Identificación de probeta	Fuerza Máxima (N)	Resistencia a la tracción (MPa)	Evidencia
ETM 07-1	100546,02	448,00	
ETM 07-2	98300,01	436,26	
ETM 07-3	98700,01	442,75	
Promedio \bar{X}	99182,013	442,334	
Desviación estándar S_{n-1}	1198,076	5,882	
Coefficiente de variación CV	1,21	1,33	

Identificación de probeta	Fuerza Máxima (N)	Resistencia a la tracción (MPa)	Evidencia
ETM 08-1	102300,01	454,25	
ETM 08-2	92550,01	413,21	
ETM 08-3	98450,01	470,11	
Promedio \bar{X}	97766,68	445,857	
Desviación estándar S_{n-1}	4910,787	29,361	
Coefficiente de variación CV	5,02	6,59	

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

3.6.2.1. Análisis de resultados del ensayo de Tracción

En la tabla 38-3 y 39-3 se muestran los resultados de resistencia a la tracción tanto para el acero ASTM A572 Gr.50 como para el acero ASTM A36. Se establece una comparación entre las juntas soldadas sin precalentamiento con las juntas soldadas con temperaturas de precalentamiento, con el fin de observar la variación de la resistencia a la tracción.

Tabla 38-3: Resistencia a la Tracción. Acero ASTM A572 Gr.50

Probeta	Resistencia a la tracción (MPa)
ETM 01	465,641
ETM 02	439,94
ETM 03	481,34
ETM 04	487,138

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

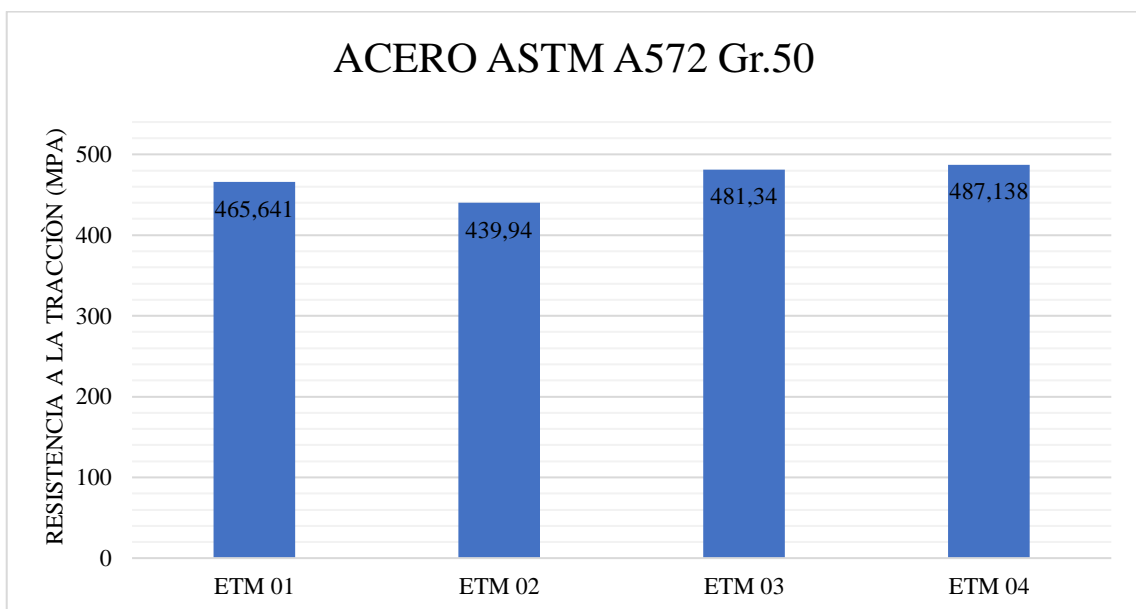


Gráfico 13-3. Comparación de resultados de ensayos de tracción para juntas de acero ASTM A572 Gr.50.

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

Los resultados obtenidos en el ensayo de tensión para las juntas de acero ASTM A572 Gr.50 se observan en el gráfico 13-3, donde se puede determinar que la junta soldada ETM 04 posee mayor resistencia a la tracción (487,14 MPa), con relación con otras muestras. Realizando una comparación con la muestra ETM 01 (465,641 MPa), la resistencia a la tensión aumenta en un 4,6% y al comparar con la probeta ETM 03 (481,34 MPa) esta propiedad aumenta en un 3,4%. Mientras que la resistencia a la tracción de la muestra ETM 02 (439,94 MPa) disminuye en relación a la muestra ETM 01 (465,641 MPa) en un porcentaje de (5,5%).

Se observa que mientras la temperatura de precalentamiento aumenta también lo hace la resistencia a la tracción en todas las muestras, a excepción de la probeta ETM 02 que esta propiedad se ve disminuida. Ahora para poder realizar una evaluación de este incremento de la resistencia a la tracción a medida que se eleva la temperatura de precalentamiento en las juntas soldadas se realiza una comparación entre el tamaño de grano, temperatura de precalentamiento y resistencia a la tracción los mismos que están representados en el gráfico 14-3.

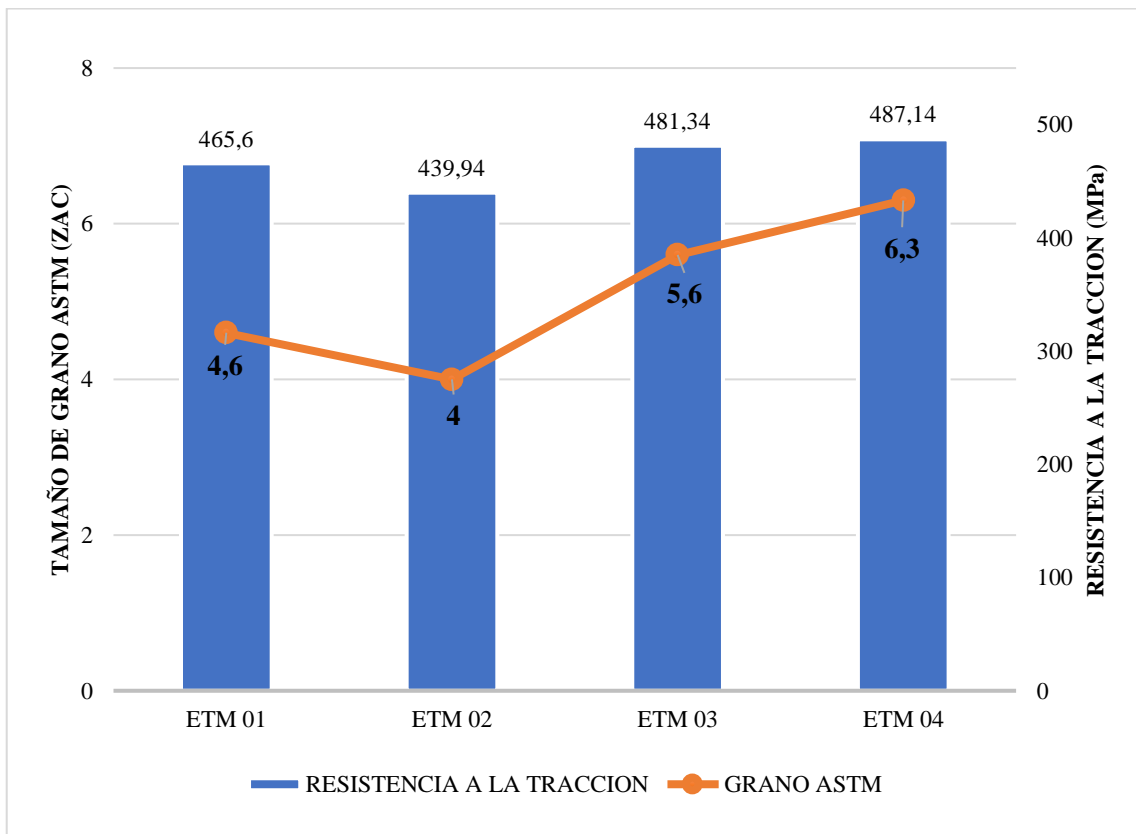


Gráfico 14- 3. Tamaño de grano ASTM - Resistencia a la Tracción acero ASTM A572 Gr.50.

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

Debido a que la rotura ocurre en la zona afectada por el calor (ZAC), entonces se puede esperar un incremento de la resistencia mecánica al elevar la temperatura de precalentamiento, debido a

que el tamaño de grano se reduce, por lo que a medida que la temperatura incrementa la resistencia mecánica aumenta. Lo que da como resultado que tamaños de grano más grandes tiene menor resistencia mecánica y a medida que incrementa la temperatura se obtiene un grano más fino por lo que la resistencia mecánica aumenta. En la probeta ETM 02 se observa una disminución de la resistencia a la tracción, así como también disminuye el tamaño de grano ASTM; lo que representa un tamaño de grano más grueso, esto influye directamente en una disminución de resistencia mecánica.

Adicionalmente, se observa en los resultados de este ensayo; que la muestra ETM 04 presenta una mayor resistencia, comparada con la junta sin precalentamiento (ETM 01) es la que posee un aumento más notorio con respecto a esta propiedad, pero también al observar los valores obtenidos entre las muestras ETM 04 y ETM 03 se determina que las placas soldadas con temperaturas de precalentamiento de 500°C es un tanto excesiva ya que con una temperatura de precalentamiento de 300°C se consigue una resistencia a la tracción similar a la junta soldada con un precalentamiento de 500°C, con una diferencia de 1,2% únicamente.

Tabla 39-3: Resistencia a la Tracción. Acero ASTM A36

Probeta	Resistencia a la tracción (MPa)
ETM 05	429,73
ETM 06	431,90
ETM 07	442,33
ETM 08	445,86

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

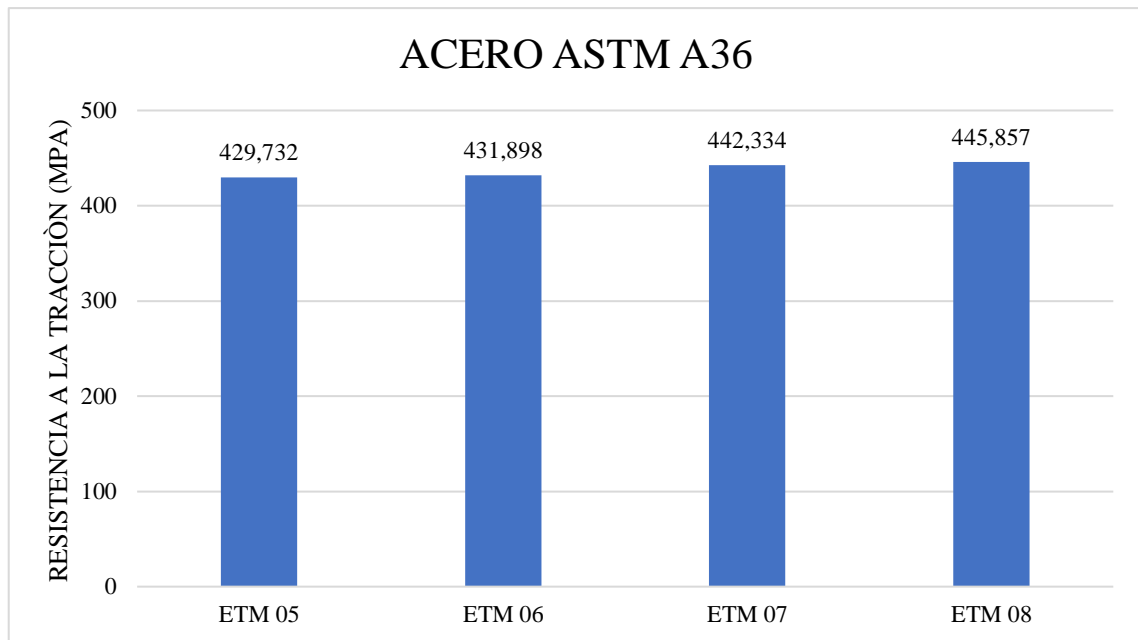


Gráfico 15-3. Comparación de resultados de ensayos de tracción para juntas de acero ASTM A36

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

Al observar el gráfico 15-3 se observa que, mientras la temperatura de precalentamiento aumenta la resistencia a la tracción también aumenta. Al realizar una comparación de esta propiedad de la muestra ETM 05 (429,73 MPa) con la muestra ETM 06 (431,898 MPa) se observa que esta aumenta en un 0,5 %. De igual forma al realizar la comparación con la probeta ETM 07 (442,334 MPa) la resistencia a la tracción aumenta en un 3% y al comparar con la muestra ETM 05 (429,73 MPa) la resistencia a la tracción aumenta en un 3,75%.

Si bien es cierto, que en la muestra ETM 08 que corresponde a junta con precalentamiento de 500°C la resistencia a la tracción aumenta más que en otras juntas, en relación con la probeta ETM 07, esta aumenta únicamente en un 0,7% .

Al igual que en el caso de las juntas soldadas de acero ASTM A572 Gr.50 se realiza una evaluación de este incremento de la resistencia a la tracción a medida que se eleva la temperatura de precalentamiento en las juntas soldadas se realiza una comparación entre el tamaño de grano, temperatura de precalentamiento y resistencia a la tracción los mismos que están representados en el gráfico 16-3.



Gráfico 16-3. Tamaño de grano ASTM - Resistencia a la Tracción acero ASTM A36

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

Ya que la rotura ocurre en la zona afectada por el calor (ZAC), entonces se puede esperar un incremento de la resistencia mecánica al elevar la temperatura de precalentamiento, debido a que el tamaño de grano se reduce, por lo que a medida que la temperatura incrementa la resistencia mecánica aumenta. Lo que da como resultado que tamaños de grano más grandes tiene menor resistencia mecánica y a medida que incrementa la temperatura se obtiene un grano más fino por lo que la resistencia mecánica aumenta. Un tamaño de grano ASTM mayor; lo que representa un tamaño de grano más fino influye directamente en un incremento de la resistencia mecánica.

3.6.3. Ensayo de Impacto

Los datos del ensayo de impacto se observan en la siguiente tabla.

Tabla 40-3: Datos de ensayo de Impacto

Lugar de Ejecución del ensayo	Laboratorio de Materiales, Centro de fomento Carrocero (Ambato)
Método de ensayo	ASTM E23
Tipo de probeta	Subestándar
Equipo utilizado	Máquina de ensayos Charpy. PIC 450 J
Tipo de muesca	Entalle en “V”
Precarga	5000 N
Fecha de realización	2020-08-31

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

Este ensayo se realiza con la finalidad de conocer la tenacidad de cada junta soldada, de igual forma se realizaron tres probetas de cada junta soldada; tanto para el acero ASTM A36 como para el acero ASTM A572 Gr.50.

En la tabla 41-3 se observa la identificación para las probetas en el ensayo de impacto, tanto para el acero ASTM A572 como para el acero ASTM A36.


Tabla 41-3: Identificación de probetas para ensayo de impacto


Identificación		Temperatura Precalentamiento
A572 Gr 50	A36	
EIM 01-1 (A) EIM 01-2 (B) EIM 01-3 (C)	EIM 05-1 (A) EIM 05-2 (B) EIM 05-3 (C)	Sin precalentamiento
EIM 02-1 (A) EIM 02-2 (B) EIM 02-3 (C)	EIM 06-1 (A) EIM 06-2 (B) EIM 06-3 (C)	115 °C
EIM 03-1 (A) EIM 03-2 (B) EIM 03-3 (C)	EIM 07-1 (A) EIM 07-2 (B) EIM 07-3 (C)	300 °C
EIM 04-1 (A) EIM 04-2 (B) EIM 04-3 (C)	EIM 08-1 (A) EIM 08-2 (B) EIM 08-3 (C)	500°C


Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020


Los resultados de los ensayos de impacto correspondientes al acero ASTM A572 se observan en la tabla 42-3. Mientras que, para el acero ASTM A36 los resultados del ensayo de impacto se observan en la tabla 43-3.

Tabla 42-3: Resultados de ensayo de impacto. Acero ASTM A572 Gr. 50

Identificación de probeta	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Energía absorbida (J)	Resistencia al impacto (KCU) (J/ cm ²)	Evidencia
EIM 01-1	23,5	45,5	23,29	93,44	
EIM 01-2	23,5	45,5	23,60	94,97	
EIM 01-3	23,5	45,5	23,44	93,85	
Promedio \bar{X}			23,443	94,09	
Desviación estándar S_{n-1}			0,155	0,79	
Coefficiente de variación CV			0,661	0,84	


Identificación de probeta	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Energía absorbida (J)	Resistencia al impacto (KCU) (J/ cm ²)	Evidencia
EIM 02-1	23,7	43,5	21,56	89,92	
EIM 02-2	23,7	43,5	21,89	85,68	
EIM 02-3	23,7	43,5	20,77	86,82	
Promedio \bar{X}			21,407	87,47	
Desviación estándar S_{n-1}			0,576	2,20	
Coefficiente de variación CV			2,689	2,51	


Identificación de probeta	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Energía absorbida (J)	Resistencia al impacto (KCU) (J/ cm ²)	Evidencia
EIM 03-1	23,8	44,3	17,01	72,12	
EIM 03-2	23,8	44,3	19,69	75,95	
EIM 03-3	23,8	44,3	18,22	75,05	
Promedio \bar{X}			18,307	74,37	
Desviación estándar S_{n-1}			1,342	2,00	
Coefficiente de variación CV			7,331	2,70	


Identificación de probeta	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Energía absorbida (J)	Resistencia al impacto (KCU) (J/ cm ²)	Evidencia
EIM 04-1	23,8	45,9	17,24	65,87	
EIM 04-2	23,8	45,9	17,93	70,38	
EIM 04-3	23,8	45,9	16,91	67,71	
Promedio \bar{X}			17,360	67,99	
Desviación estándar S_{n-1}			0,520	2,27	
Coefficiente de variación CV			2,998	3,34	


Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

Tabla 43-3: Resultados de ensayo de impacto. Acero ASTM A36

Identificación de probeta	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Energía absorbida (J)	Resistencia al impacto (KCU) (J/ cm ²)	Evidencia
EIM 05-1	23,9	47,6	39,11	100,62	
EIM 05-2	23,9	47,6	38,10	95,59	
EIM 05-3	23,9	47,6	39,96	103,34	
Promedio \bar{X}			39,057	99,85	
Desviación estándar S_{n-1}			0,931	3,93	
Coefficiente de variación CV			2,384	3,94	

Identificación de probeta	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Energía absorbida (J)	Resistencia al impacto (KCU) (J/ cm ²)	Evidencia
EIM 06-1	24,0	44,8	37,84	94,08	
EIM 06-2	24,0	44,8	35,34	90,52	
EIM 06-3	24,0	44,8	35,34	89,60	
Promedio \bar{X}			36,173	91,40	
Desviación estándar S_{n-1}			1,443	2,37	
Coefficiente de variación CV			3,990	2,59	

Identificación de probeta	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Energía absorbida (J)	Resistencia al impacto (KCU) (J/ cm ²)	Evidencia
EIM 07-1	24,2	44,2	24,10	60,68	
EIM 07-2	24,2	44,2	21,91	54,58	
EIM 07-3	24,2	44,2	18,59	47,49	
Promedio \bar{X}			21,533	54,25	
Desviación estándar S_{n-1}			2,774	6,60	
Coefficiente de variación CV			12,883	12,16	

Identificación de probeta	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Energía absorbida (J)	Resistencia al impacto (KCU) (J/ cm ²)	Evidencia
EIM 08-1	24,1	44,3	21,91	55,66	
EIM 08-2	24,1	44,3	23,80	61,43	
EIM 08-3	24,1	44,3	20,26	50,83	
Promedio \bar{X}			21,990	55,97	
Desviación estándar S_{n-1}			1,771	5,31	
Coefficiente de variación CV			8,055	9,48	

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

3.6.3.1. Análisis de resultados del ensayo de Impacto

Con los resultados obtenidos en el ensayo Charpy se logró comparar la tenacidad de cada junta soldada. Los valores de resistencia al impacto y energía absorbida se muestran en las tablas 44-3 y 45-3.

Tabla 44-3: Energía absorbida y Resistencia al impacto. Acero ASTM A572 Gr. 50

Probeta	Energía absorbida (J)	Resistencia al impacto (J/cm ²)
EIM 01	23,44	94,09
EIM 02	21,41	87,47
EIM 03	18,31	74,37
EIM 04	17,36	67,99

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

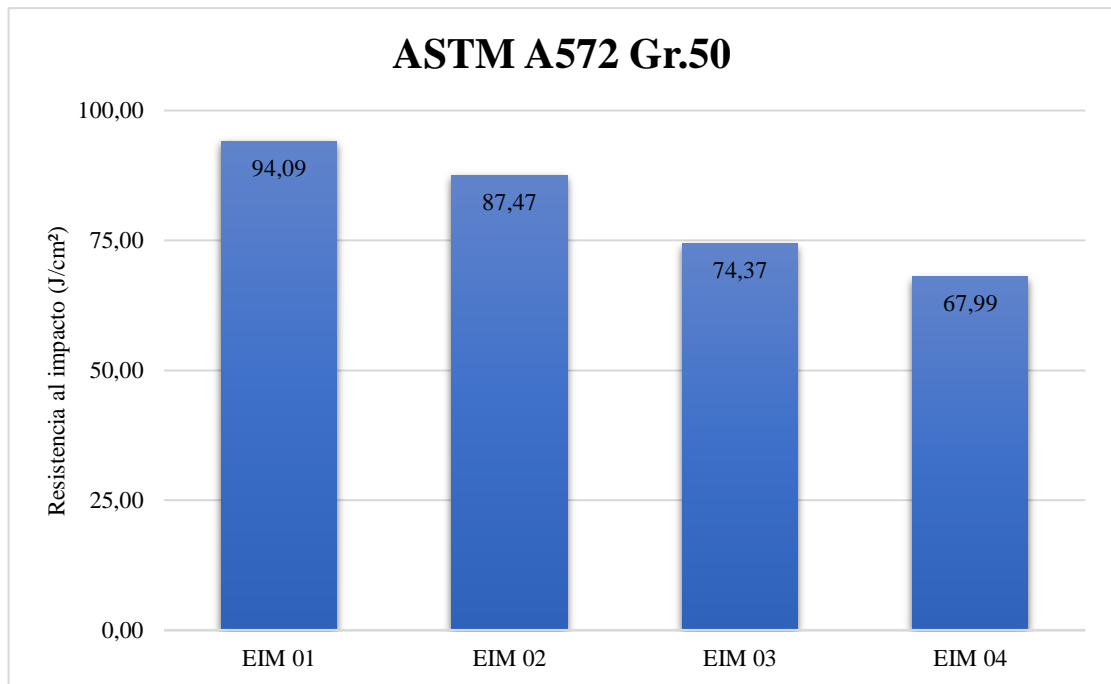


Gráfico 17-3. Comparación de resultados de ensayos de impacto para acero ASTM A572 Gr.50

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

Al observar el gráfico 17-3, se puede determinar que la junta soldada con mayor resistencia al impacto por ende la mayor energía absorbida, es la muestra EIM 01 con valor de 94,09 J/cm², la probeta EIM 02, que corresponde a un precalentamiento de 115°C, se observa una disminución en la tenacidad obteniéndose un valor de 87,47 J/cm², esta disminución es representada el 7%. Mientras que al realizar una comparación entre las muestras EIM 01 (94,09 J/cm²) y EIM 03 (74,37 J/cm²) se observa una disminución de 20% y finalmente estableciendo una comparación con la muestra EIM 04 (67,99 J/cm²) se determina que la resistencia al impacto decrece en un porcentaje de 27,7%.

Tabla 45-3: Energía absorbida y Resistencia al impacto. Acero ASTM A36

Probeta	Energía absorbida (J)	Resistencia al impacto (J/cm ²)
EIM 05	39,057	99,85
EIM 06	36,173	91,4
EIM 07	21,533	54,25
EIM 08	21,99	55,97

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

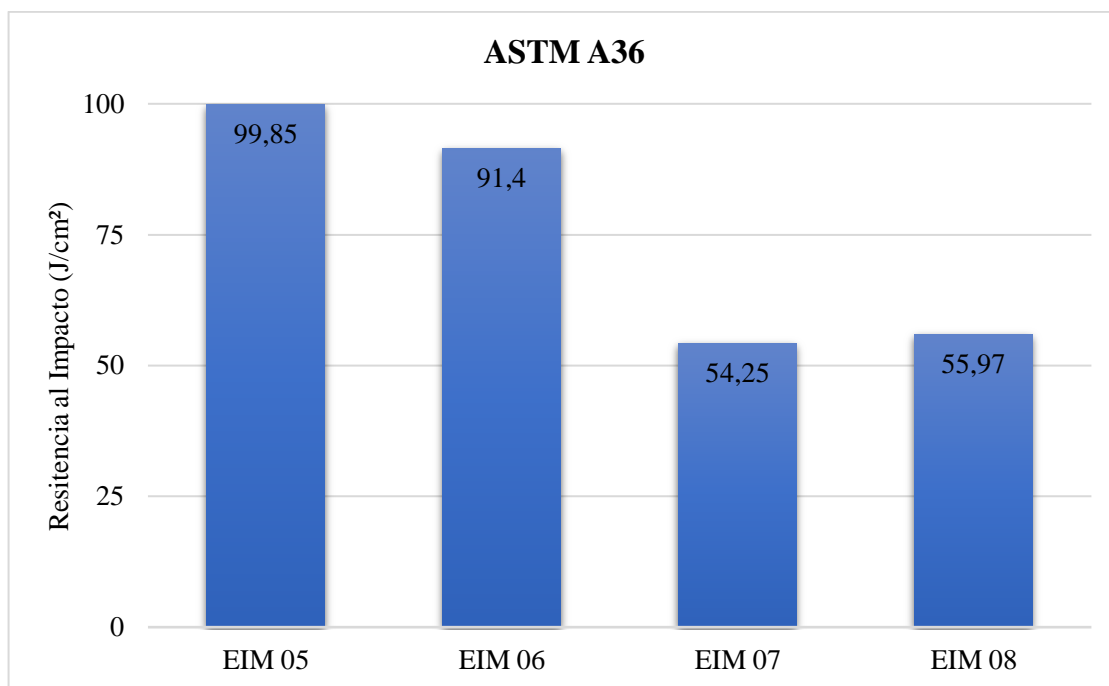


Gráfico 18-3. Comparación de resultados de ensayos de impacto para acero ASTM A36

Realizado por: Medina, E., Vaca, R. 2020

En el gráfico 18-3 se observa una comparación de resultados de los valores promedio obtenidos para las diferentes muestras ensayadas. Se determina que la junta que más energía absorbe por ende tiene mayor resistencia al impacto, es la junta EIM 05 (99,85 J/cm²) que corresponde a la junta soldada sin precalentamiento. Al realizar una comparación con la probeta obtenida de la junta soldada con precalentamiento de 115°C que corresponde a la muestra EIM 06 (91,4 J/cm²), la resistencia al impacto disminuye en un 8,5%. Mientras que al realizar una comparación con la muestra EIM 07 (54,25 J/cm²) se determina una reducción del 45,7 % en relación a la probeta EIM 01. Finalmente, al comparar la muestra EIM 08 (55,97 J/cm²) con la muestra EIM 05 se observa una disminución de 43,9%. La probeta EIM 08 y EIM 07 poseen valores muy parecidos de resistencia al impacto.

Como se observó en las micrografías tanto para el acero ASTM A36 y ASTM A572 Gr.50, al tener estructuras principalmente ferrito perlíticas, es la morfología de grano ferrítico lo que produce una reducción de la resistencia al impacto, debido a que a medida que incrementamos la temperatura empieza a aparecer ferrita en forma de placas, las mismas que pueden producir un deslizamiento entre placas muy fácil al momento de la prueba de impacto, entonces al existir un fácil recorrimiento entre placas debido a que presenta superficies de corrimiento fácil se da una reducción de la resistencia al impacto. Ya que si se tiene un grano más equiaxial es muy

difícil el movimiento entre granos por la morfología del mismo y cuando se presenta ferrita en forma de placas estas placas exhiben muy poca resistencia al impacto.

También puede ocurrir que al existir temperaturas muy altas de precalentamientos aumente el ancho de la ZAC, lo que conlleva a un aumento de la zona de grano grueso que afecta a la resistencia mecánica y la resistencia al impacto del material.

La resistencia al impacto disminuye, mientras la temperatura de precalentamiento aumenta y las zonas duras (Listones de Bainita) en la ZAC van disminuyendo debido a velocidades de enfriamiento más lentas.

CONCLUSIONES

En el presente estudio se investigó la influencia de la aplicación de temperaturas de precalentamiento tanto en las propiedades mecánicas y microestructurales en juntas soldadas de acero ASTM A36 y ASTM 572 Gr.50. Basado en el análisis de los resultados obtenidos en el Capítulo 3, se obtienen las siguientes conclusiones:

- En el ensayo de tintas penetrantes se determinó que las juntas son aceptadas, debido a que no se encontraron discontinuidades o alguna indicación que mediante la aplicación de la norma nos diga que la junta puede ser rechazada.
- El precalentamiento y la composición química de cada acero, influyeron en la formación de microestructuras finales de cada tipo de junta; en todas las juntas soldadas tanto como para acero ASTM A36 y ASTM A572 Gr.50, en la zona del cordón de soldadura se observó principalmente la presencia de ferrita y en poca cantidad perlita. En la zona del metal base de igual manera se obtuvo en su gran mayoría una microestructura ferrítica.
- Para la zona afectada por el calor ZAC de las juntas soldadas de acero ASTM A36, se determina microestructura de tipo ferrita Widmanstatten, zonas con ferrita acicular y la presencia de ferrita en los límites de grano. A medida que la temperatura de precalentamiento aumenta se observa que la presencia de Bainita va disminuyendo y que se forma placas laterales de ferrita.
- En la ZAC de las muestras de acero ASTM A572 Gr.50 de igual forma se observa Microestructuras como la ferrita acicular y Widmanstatten son propias de estas zonas en soldaduras de aceros al carbono. Y la formación de ferrita en los límites de grano, al igual que en el caso de las juntas de acero ASTM A36 la cantidad de Bainita presente en las micrografías disminuye hasta desaparecer completamente en las juntas soldadas a 500°C, donde se observa únicamente la presencia de ferrita en forma de placas.
- Debido al ciclo térmico que se afecta la entrada de calor y la velocidad de enfriamiento en las diferentes juntas soldadas se observa que en la junta sin precalentamiento existe mayor presencia de listones de Bainita en comparación con las juntas en las que se realizó el precalentamiento, por lo que la microdureza se ve disminuida al realizar el proceso de soldadura con precalentamiento.

- Mediante ensayos de microdureza realizados a las juntas soldadas de acero ASTM A36 como para acero ASTM A572, se observó que al aumentar la temperatura de precalentamiento los valores de microdureza disminuyen. Observándose que para placas soldadas con precalentamiento de 300°C y 500°C los valores no difieren en gran medida entre ellas.
- Se observa en las juntas de acero ASTM A36 un incremento de la resistencia mecánica al elevar la temperatura de precalentamiento, debido a que el tamaño de grano se reduce, por lo que a medida que la temperatura incrementa la resistencia mecánica aumenta. Lo que da como resultado que tamaños de grano más grandes tienen menor resistencia mecánica y a medida que incrementa la temperatura se obtiene un grano más fino por lo que la resistencia mecánica aumenta. En la probeta ETM 02 se observa una disminución de la resistencia a la tracción, así como también disminuye el tamaño de grano ASTM; lo que representa un tamaño de grano más grueso, esto influye directamente en una disminución de resistencia mecánica.
- Para las juntas de acero ASTM A572 Gr.50 se observa que la resistencia a la tracción aumenta a medida que la temperatura de precalentamiento aumenta también, al realizar un análisis mediante el tamaño de grano se observa, como resultado que tamaños de grano más grandes tiene menor resistencia mecánica y a medida que incrementa la temperatura se obtiene un grano más fino por lo que la resistencia mecánica aumenta. Un tamaño de grano ASTM mayor; lo que representa un tamaño de grano más fino influye directamente en un incremento de la resistencia mecánica.
- En las micrografías del acero ASTM A36 y ASTM A572 Gr.50, al tener morfologías de grano ferrítico hace que se dé una reducción de la resistencia al impacto, debido a que a medida que incrementamos la temperatura empieza a aparecer ferrita en forma de placas, las mismas que pueden producir un deslizamiento entre placas muy fácil al momento de la prueba de impacto, entonces al existir un fácil recorrimiento entre placas debido a que presenta superficies de corrimiento fácil. Se da una reducción de la resistencia al impacto. La presencia de ferrita en forma de placas en las muestras EIM 03, EIM04, EIM 07 y EIM 08 (juntas soldadas a 300 °C y 500°C respectivamente) exhiben menor resistencia al impacto en comparación a las muestras EIM 01, EIM 02, EIM 05 y EIM 06 (juntas soldadas sin precalentamiento y soldadas a 115°C).
- En las juntas soldadas de acero ASTM A36 y ASTM A572, la resistencia al impacto disminuye, mientras la temperatura de precalentamiento aumenta y las zonas duras (Listones de Bainita) en la ZAC van disminuyendo debido a velocidades de enfriamiento más lentas. Lo

que hace menos probable que en juntas soldadas con precalentamiento posean defectos de soldadura como fisuras en frío o en caliente.

RECOMENDACIONES

- Para realizar los procesos de soldadura y el precalentamiento de juntas, así como también, para la realización de ensayos. Se recomienda usar el equipo de protección personal (mandil, gafas guantes con protección térmica) debido a que se trabajan a temperaturas elevadas.
- Basándose en las propiedades mecánicas y microestructurales obtenidas se recomienda controlar el procedimiento y los parámetros de soldadura, tales como el amperaje y temperatura entre pases entre los más importantes. Con el fin de garantizar la homogeneidad de la junta.
- Para la obtención de temperaturas pico alcanzadas en la soldadura y su medición experimental se recomienda la utilización de una cámara térmica que hacen una medición exacta en tiempos necesarios.
- Con el propósito de ampliar la investigación se recomienda mantener constantes los parámetros de soldadura a diferentes temperaturas de precalentamiento y observar los defectos que se podrían obtener en las juntas.
- Para la obtención de valores confiables en los ensayos, se recomienda seguir las especificaciones de las normas que se empleen para los mismos.

GLOSARIO

Amperaje: cantidad de corriente eléctrica que fluye cuando se suelda (Hidalgo y Lozada, 2007: p. 47).

Acabado superficial: resultado que representa una superficie después de un proceso de fabricación o manufactura (EcuRed, 2018).

Arco eléctrico: corriente eléctrica que se produce en por la diferencia de potencial eléctrico entre la pieza de trabajo y electrodo (Hidalgo y Lozada, 2007: p. 47).

Cóncavo: curvatura hacia adentro (Indura, 2017).

Convexo: curvatura hacia afuera (Indura, 2017).

Electrodo: conductor eléctrico que aporta corriente eléctrica a una pieza (Sánchez y Rincón, 2018).

Escoria: impurezas que son segregadas durante la solidificación que deben ser eliminadas después del proceso de soldadura (Aguilar, 2014).

Fusión: calentamiento de metales hasta que llegan a su fase líquida y se unen entre sí (West Arco, 2015).

Grieta: también llamada fisura, es una abertura alargada con muy poca separación entre los bordes (Navarro, 2008).

Incidencia: Influencia de determinada cosa en un asunto o efecto que causa en él (Oxford Languages, 2020).

Inclusión metálica: metal integrado mediante un proceso de manufactura o proceso de soldadura (Rodríguez, 2013).

Análisis microestructural: determinación de microconstituyentes de un material, generalmente se emplea para el mismo un microscopio óptico o electrónico de barrido (Pástor, 2002).

Metodología: Conjunto de métodos que se siguen en una investigación científica (Oxford Languages, 2020).

Micrografía: Una micrografía es la imagen obtenida de objetos no visibles a simple vista mediante la ayuda de instrumentos ópticos o electrónicos como lupas y microscopios (Suarez, 2017).

Microidentación: micro huella que deja un indentador, generalmente para medición de dureza Vickers (Rodríguez, 2013).

Muesca: corte que se hace como señal en una superficie (Oxford Languages, 2020).

Precalentamiento: aplicación de una temperatura determinada a un elemento o material antes de realizar con él un proceso de manufactura o fabricación (Garavito, 2008).

Ranura: hendidura o canal que se abre en un cuerpo sólido (Oxford Languages, 2020).

Recristalización: procedimiento realizado a ciertos materiales con el fin de obtener una nucleación o crecimiento de grano sin cambios de fase (IngeMecánica, 2012).

Soldabilidad: propiedad que posee un metal que le permite ser soldado y obtener una soldadura homogénea y de buena calidad (Pástor, 2002).

Soldadura de Filete: soldadura muy usada para rellenar los bordes de juntas de esquina, en te o sobrepuestas (Aguilar, 2014).

BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN WELDING SOCIETY. *Welding Science and Technology*. 7ª ed. Miami – EE. UU: W. H Kearns, 2001, pp. 2-8.

AGUILAR, Juan. *Soldadura por arco*. [Blog]. 2013. [Consulta: 02 octubre 2019]. Disponible en: http://biblio3.url.edu.gt/Libros/2013/pro_ma/17.pdf

AWS D1 .1/D1.1M:2010. *Codigo de Soldadura estructural- acero*. 2010.

ASTM A36/A36M-08. *Especificación Normalizada para Acero al Carbono Estructural*. 2008.

ASTM A572/A572M-07. : *Especificación Normalizada para Acero Estructural de Alta Resistencia de Baja Aleación de Columbio-Vanadio*. 2007.

ASTM E 3-11. 2017. *Standar Practice for Preparation of Metallographic Specimens*. 2017.

ASTM E112. 2013. *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*. 2013.

ASTM E23. 2011. *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*. 2011.

ASTM E384. 2017. *Standar Test Method for Knoop and Vickers hardness of materials*. 2017.

AWS A5.1. 2004. *Specificartion for Carbon Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding*. 2004.

AWS B1.10M/B1.10:2016. 2016. *Guide for the Nondestructive Examination of Welds*. 2016.

AWS B4.0. 2016. *Standard Methods for Mechanical Testing of Welds*. 2016.

AWS D1.1/D1.1M:2015. Anexo H. *Guideline on Alternative Methods for Determining Preheat*. 2015.

DIPAC. *Catálogos de Productos*. [Blog]. [Consulta: 10 diciembre de 2019]. Disponible en: <https://dpl.cometa.ec/catalogos/>

ECURED. *Acabados superficiales*. [Blog]. [Consulta: 28 julio de 2020]. Disponible en: https://www.ecured.cu/Acabado_superficial

GARAVITO, J. *Tratamientos Térmicos Protocolo* [en línea]. 2008. [Citado el: 12 de diciembre de 2019]. Disponible en: https://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/1537_tratamientostermicosr2.pdf

GERDAU, A. *Compendio de normas para Acero*. 3ª ed. Santiago de Chile – Chile. 2016, pp. 17-18.

HIDALGO ANDRANGO, Darwin Paúl & LOZADA CEDEÑO, Hugo Limber. *Cálculo y análisis de soldadura para proceso SMAW en aceros al carbono y aleados*. (Trabajo de titulación) (Pregrado), Escuela Politécnica Nacional, Escuela de Formación Tecnológica, Quito, Ecuador. 2007. p. 47.

HOWARD , B & SCOTT C. *Modern Welding Technology*. 4ª ed. México DF – Mexico: Prentice-Hall, 2010. ISBN 0-13-599283-4, pp 6-7.

INDURA. *Manual de sistemas y materiales de soldadura*. Santiago de Chile – Chile. 2017, p. 31.

MARTINEZ , M; et al. “Influencia del tamaño del grano en las propiedades mecánicas de los aceros”. *Revista de Metalurgia [en línea]*, (España) 2005, Vol. 41, pp. 64-67. [Consulta: 07 abril 2020]. ISSN-L 0034-8570. Disponible en: <https://doi.org/10.3989/revmetalm.2005.v41.iExtra.1000>

INGEMECÁNICA. *Fundamentos de la Soldadura por arco*. [Blog]. 2012. [Consulta: 02 noviembre de 2019]. Disponible en: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn40.html>.

KOBELCO. *Arc Welding of Specific Steels and Cast Iron*. Tokio, Japón 2015, pp. 3-22.

KOBELCO STEEL. *Weld Imperfections and Preventive Measures*. Tokio, Japón, 2015, pp. 9-15.

LAUFGANG , S. *Tratamiento térmico de la soldadura*. Termo Soldex S.A., 2013, pp. 26-31.

LICHAN, Li; et al. “Effect of Welding Heat Input on Grain Size and Microstructure of 316L Stainless Steel Welded Joint”. *Trans Tech Publications, Applied Mechanics and Materials [en línea]*, (Suiza) 2013, Vol. 331, pp. 64-67. [Consulta: 07 abril 2020]. Disponible en: [doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.331.578](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.331.578).

LINCOLN ELECTRIC. *Preheating for Welding Explained*. [Blog]. 2017. [Consulta: 10 diciembre de 2019]. Disponible en: <https://www.lincolnelectric.com/en-us/support/process-and-theory/Pages/preheat-detail.aspx>

MCCORMAN, J & CSERNAK S. *Diseño de Estructuras de Acero*. 5ª ed. México: Alfaomega, 2013. ISBN: 978 607 707 559 2, pp. 469-480.

METAL ARTS PRESS. *Metal Arts Press*. [Blog]. 2019. [Consulta: 28 de noviembre de 2019.] Disponible en: <http://www.metalartspress.com/books/chapters/chapter-5-shielded-metal-arc-welding>.

MILLER WELDS. *Guidelines for Shielded Metal Arc Welding (SMAW)* [en línea]. Illinois- EE. UU, 2018. [Consulta: 20 septiembre 2019]. Disponible en: https://www.millerwelds.com/-/media/miller-electric/files/pdf/resources/guidelines_smaw.pdf

MIPSA. *Acero de grado estructural*. [Blog] 2019. [Consulta: 29 de noviembre de 2019.] Disponible en: <https://www.mipsa.com.mx/dotnetnuke/Sabias-que/Informacion-general-acero/>

MIPSA. *Efecto del carbono en la soldabilidad*. [Blog] 2019. [Consulta: 30 de noviembre de 2019.] Disponible en: <https://www.mipsa.com.mx/sabias-que/clasificacion-del-acero/>

MUHAED, J & SHAKIR, G. “Study the effect of heat treatments on spring -back in U-bending process”. *International Journal of Metallurgical Materials and Engineering [en línea]*, 2013, (Iraq) (3), p. 55. [Consulta: 20 de julio de 2020]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/235957389_Study_the_effect_of_heat_treatments_on_spring-back_in_U-bending_process.

SANCHEZ OSORIO, Manuel Alfredo & RINCÓN REINA, Edwin Eduardo. Análisis de soldabilidad del acero estructural ASTM A572 grado 50 con el proceso desoldado al arco eléctrico con electrodo tubular autoprotegido (FCAW-S) y compararla con el proceso de soldadura al arco con electrodo metálico revestido (SMAW). (Trabajo de titulación) (Pregrado), Fundación Universitaria Los Libertadores, Escuela de Ingeniería Mecánica, Bogotá, Colombia. 2018. p. 24.

NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN (NEC) 2014. *Estructuras de Acero*. 2014.

NIEBLES , E & ARNEADO , W. “Procedimientos de Soldadura y Calificación de Soldadores: una Propuesta de Enseñanza y Guía de Aplicación para la Industria”. SCielo [en línea], 2009, (Colombia) 20 (3), pp. 24-26. [Consulta: 29 de noviembre de 2019]. Disponible en: doi:10.1612/inf.tecnol.4064it.08

OXFORD LANGUAGES. Definición de incidencia [en línea] 2020. [Consulta: 25 de julio de 2020.] Disponible en:

https://www.google.com/search?bih=689&biw=1280&hl=es&sxsrf=ALeKk003BncwlQf_HLpBvtYuWaYP4VkXLQ%3A1598380008682&ei=6FdFX7-FKYPr5gKImaqYCA&q=que+es+incidencia+&oq=que+es+incidencia+&gs_lcp=CgZwc3ktYWIQAzIECCMQJzICCAAyAggAMgIIADICCAAyAggAMgIIADICCAAyAggAMgIIAFDHHljHHmCjI2gAcAB4AIABrQGIAdkCkgEDMC4ymAEAoAEBqgEHZ3dzLXdpesABAQ&scie nt=psy-ab&ved=0ahUKEwi_mYjF_bbrAhWDtVkKHYiMCoMQ4dUDCA0&uact=5

PÁSTOR, M. *Introducción a la Metalurgia de la Soldadura*. Riobamaba- Ecuador : ESPOCH, 2002, pp 53-88.

RODRIGUEZ, P. *Metalurgia de la Soldadura*. La Habana- Cuba: Universitaria, 2013. ISBN 978-959-16-2101-6 pp 71-79.

SUÁREZ RUBIANO, Jhoan Sebastián. Influencia de la temperatura de precalentamiento en la soldabilidad de un acero doble fase. (Trabajo de titulación) (Pregrado), Universidad Distrital Francisco José de Caldas Departamento de Ingeniería Mecánica, Bogotá, Colombia. 2017. pp 17-20.

UNIVERSIDAD AUTONOMA METROPOLITANA DE MÉXICO. *Elementos de acero*. [En línea]. México DF- México, 2018. [Consulta: 20 diciembre 2019]. Disponible en: <http://materiales.azc.uam.mx/gjl/Clases/ELEMACERO/S1.pdf>

WEST ARCO. *Manual de Soldadura*. Bogotá – Colombia. 2015. pp. 17-19

YANUS, A. C. *Transferencia de Calor y Masa*. 3ª ed. México DF – Mexico: McGraw-Hill, 2007. ISBN- 13: 978-970-10-6173-2. pp. 511, 860,884.



Firmado electrónicamente por:
JHONATAN RODRIGO
PARREÑO UQUILLAS



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE
CHIMBORAZO
DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS
PARA EL APRENDIZAJE Y LA INVESTIGACIÓN



UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS
REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 22 / 12 / 2020

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)

Nombres – Apellidos: Erika Pahola Medina Guamán
Ronald Patricio Vaca Guadalupe

INFORMACIÓN INSTITUCIONAL

Facultad: Mecánica

Carrera: Ingeniería Mecánica

Título a optar: Ingeniero Mecánico

f. Analista de Biblioteca responsable: Ing. CPA. Jhonatan Rodrigo Parreño Uquillas. MBA.



22-12-2020

0493-DBRAI-UPT-2020