

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA



MAESTRÍA EN MECÁNICA, MENCIÓN MANUFACTURA COHORTE 2019

TEMA:

**“MODELO NUMÉRICO DE FORMACIÓN DE CORDÓN Y
DISTRIBUCIÓN DE CALOR EN LA SOLDADURA DE PASES DE
REVENIDO PARA EL PROCESO DE REPARACIÓN DE UN RODETE
TIPO PELTON”**

Trabajo de titulación

Previa a la obtención del Grado Académico de Magister Mecánica, Mención Manufactura

Autor: Ing. Ambar Carolina Yépez Intriago

Director: Ing. Wilson Henry Vaca Ortega, Mg.

Ambato- Ecuador

2021

APROBACIÓN DEL TUTOR

En calidad de tutor del Trabajo de Titulación presentado, previo a la obtención del título Magíster en Mecánica, Mención Manufactura. Con el tema: **“MODELO NUMÉRICO DE FORMACIÓN DE CORDÓN Y DISTRIBUCIÓN DE CALOR EN LA SOLDADURA DE PASES DE REVENIDO PARA EL PROCESO DE REPARACIÓN DE UN RODETE TIPO PELTON”**, elaborado la Ing. Ambar Carolina Yépez Intriago con cedula de identidad C.I. 1722772249 Maestrante de la MAESTRÍA EN MECÁNICA, MENCIÓN MANUFACTURA COHORTE 2019 de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica

Certifico:

- Que el presente Trabajo de Titulación es original de su autor.
- Ha sido revisado cada uno de sus capítulos componentes.
- Está concluido en su totalidad.

Ing. Wilson Henry Vaca Ortega, Mg.

CI:1803729126

DIRECTOR

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

La responsabilidad de las opiniones, comentarios y críticas emitidas en el Trabajo de Titulación presentado con el tema: “**MODELO NUMÉRICO DE FORMACIÓN DE CORDÓN Y DISTRIBUCIÓN DE CALOR EN LA SOLDADURA DE PASES DE REVENIDO PARA EL PROCESO DE REPARACIÓN DE UN RODETE TIPO PELTON**”, le corresponde exclusivamente a la: Ingeniera Ambar Carolina Yépez Intriago , Autor bajo la Dirección del Ingeniero Wilson Henry Vaca Ortega, Magister, Director del Trabajo de Titulación; y el patrimonio intelectual a la Universidad Técnica de Ambato.

Ing. Ambar Carolina Yépez Intriago

CI:1722772249

AUTOR

Ing. Wilson Henry Vaca Ortega, Mg.

CI:1803729126

TUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que el Trabajo de Investigación, sirva como un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos de mi trabajo, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de esta, dentro de las regulaciones de la Universidad.

Ing. Ambar Carolina Yépez Intriago
CI:1722772249

APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

A la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica
El Tribunal receptor del Trabajo de Investigación presidido por el Ingeniero Wilson
Santiago Medina Robalino, Mg, e integrado por los señores: Ing. Francisco Agustín
Peña Jordán Msc., Ing. Víctor Rodrigo Espín Guerrero, Mg., designados por la Unidad
Académica de Titulación de la Universidad Técnica de Ambato, para receptor el
Trabajo de Titulación con el tema: “**MODELO NUMÉRICO DE FORMACIÓN
DE CORDÓN Y DISTRIBUCIÓN DE CALOR EN LA SOLDADURA DE
PASES DE REVENIDO PARA EL PROCESO DE REPARACIÓN DE UN
RODETE TIPO PELTON**”, elaborado y presentado por la Ing. Ambar Carolina
Yépez Intriago, para optar por el Grado Académico de Magister Mecánica, Mención
Manufactura; una vez escuchada la defensa oral del Trabajo de Investigación el
Tribunal aprueba y remite el trabajo para uso y custodia en las bibliotecas de la UTA.

Ing. Wilson Santiago Mediana Robalino, Mg.
Presidente del Tribunal

Ing. Francisco Agustín Peña Jordán Msc.
Miembro del Tribunal

Ing. Víctor Rodrigo Espín Guerrero, Mg.
Miembro del Tribunal

DEDICATORIA

A mis hijos Eduardo, Ricardo y Fernando, quienes son mi constante inspiración y mi fortaleza. A mi amado esposo Marco quien me ha brindado su mano y su apoyo incondicional. A mi mamá quien es la luz de mis días y mis cimientos, quien siempre cree en mí.

AGRADECIMIENTO

Mi mayor agradecimiento es a Dios, presencia perenne en mi vida, quien me guía y auxilia en todo momento

Un especial agradecimiento al Ing. Henry Vaca, tutor del presente proyecto, quien me ha sabido guiar para su desarrollados entendiendo todos los obstáculos encontrados.

Al Personal del Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas CIRT, en especial al Ing. Marco Zabala e Ing. Julio Chonata por su contingente y apoyo incondicional para el desarrollo de esta investigación.

A mis amigos y familiares, quienes de una y otra forma contribuyeron a la realización del presente trabajo de titulación.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

Aprobación del Tutor	ii
Autoría del Trabajo De Titulación	ii
Derechos de Autor.....	iii
Aprobación del Trabajo de Titulación	iv
Dedicatoria	v
Agradecimiento	vi
Índice General de Contenidos	vii
Resumen Ejecutivo.....	xv
Abstract	xvi
1. CAPITULO I.....	1
1.1. Antecedentes Investigativos.....	1
1.2. Problema	5
1.3. Objeto.....	5
1.4. Campo	5
1.5. Justificación	5
1.6. Objetivos	6
1.6.1. Objetivo General.....	6
1.6.2. Objetivos Específicos	6
1.7. Hipótesis	6
1.7.1. Señalamiento de Variables	7
1.8. Fundamentación Teórica.....	7
1.8.1. Simbología.....	7
1.8.2. Acero inoxidable martensítico.....	8
1.8.3. Acero Inoxidable Martensítico ASTM A743 Grado CA6-NM.....	10
1.8.4. Soldadura para Aceros Inoxidables Martensíticos	12
1.8.5. Metalurgia de la Soldadura en Aceros Inoxidables Martensíticos	14

1.8.6. Zona Térmicamente Afectada.....	16
1.8.7. Proceso de Soldadura para Aceros Inoxidables Martensíticos	18
1.8.8. Soldadura por Arco con Electrodo de Tungsteno con Protección Gaseosa.....	20
1.8.9. Transferencia de Calor en la Soldadura.....	20
1.8.10. Cálculo de la Temperatura Durante el Proceso de Soldadura.....	27
1.8.11. Ciclo Térmico de la Soldadura.....	29
1.8.12. Formación de Cordón.....	31
1.8.13. Predicción de la Dureza	35
1.8.14. Modelado Numérico.....	42
2. CAPÍTULO II	44
2.1. Recursos Materiales	44
2.1.1. Materiales	44
2.1.2. Equipos	45
2.2. Metodología	48
2.2.1. Nivel o Tipo De Investigación.....	48
2.3. Operacionalización de variables	49
Variable Independiente.	49
2.4. Población y Muestra	50
2.4.1. Población	50
2.4.2. Muestra	51
2.5. Proceso	52
2.6. Recolección de la Información	53
2.7. Procesamiento de la información.....	54
2.7.1. Plan de procesamiento	54
3. CAPÍTULO III	55
3.1. Análisis y Discusión de los Resultados	55
3.1.1. Recopilación de datos preliminares	55
3.1.2. Diseño por Elementos Finitos.....	108
3.1.3. Ensayos Realizados	111
3.1.4. Comparación de Datos.....	128
3.2. Verificación de Hipótesis.....	129
4. CAPÍTULO IV	131

4.1. Descripción	131
4.2. Objetivos	131
4.2.1. Objetivo General.....	131
4.2.2. Objetivos Específicos	131
4.3. Desarrollo.....	131
4.3.1. Viabilidad	132
4.3.2. Planificación	132
4.3.3. Ejecución	133
5. CAPÍTULO V	141
6. Referencias Bibliográficas	145

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Composición química nominal del acero ASTM A743 -CA6-NM.....	11
Tabla 1-2: Valor de coeficiente de transferencia	26
Tabla 1-3: Eficiencia Térmica.....	31
Tabla 2-1: Composición química nominal del acero ASTM A 743 CA6-NM.....	44
Tabla 2-2: Propiedades mecánicas de la aleación CA6-NM según ASTM A743. ...	44
Tabla 2-3: Composición química del metal de aporte martensítico.....	45
Tabla 2-4: Operacionalización Variable Independiente.....	49
Tabla 2-5: Operacionalización Variable Dependiente	50
Tabla 2-6. Factores de experimentación	51
Tabla 3-1: Composición química del material base.....	56
Tabla 3-2: Composición química del material base.....	56
Tabla 3-3: Energía de Entrada Probetas.....	65
Tabla 3-4: Ancho de Zona Térmica Afectada.....	66
Tabla 3-5: Propiedades Mecánicas y Físicas Probeta 01	67
Tabla 3-6: Temperaturas calculadas Probeta 01, Primer Pase.....	67
Tabla 3-7: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 01, y = 0mm.....	69
Tabla 3-8: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 01, y = 1mm.....	70
Tabla 3-9: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 01, y = 2mm.....	71
Tabla 3-10: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 01, y = 3mm.....	72
Tabla 3-11: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 01, y = 4mm.....	73
Tabla 3-12: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 01, y = 5mm.....	74
Tabla 3-13: Propiedades Mecánicas y Físicas Probeta 02	77
Tabla 3-14: Temperaturas calculas Probeta 02, Primer Pase.....	77
Tabla 3-15: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 02, y = 0mm.....	79
Tabla 3-16: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 02, y = 1mm.....	80
Tabla 3-17: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 02, y = 2mm.....	81
Tabla 3-18: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 02, y = 3mm.....	82
Tabla 3-19: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 02, y = 4mm.....	83
Tabla 3-20: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 02, y = 5mm.....	84
Tabla 3-21: Propiedades Mecánicas y Físicas Probeta 03	87
Tabla 3-22: Temperaturas calculas. Probeta 03, Primer Pase.....	87

Tabla 3-23: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 03, y = 0mm.....	89
Tabla 3-24: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 03, y = 1mm.....	90
Tabla 3-25: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 03, y = 2mm.....	91
Tabla 3-26: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 03, y = 3mm.....	92
Tabla 3-27: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 03, y = 4mm.....	93
Tabla 3-28: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 03, y = 5mm.....	94
Tabla 3-29: Propiedades Mecánicas y Físicas Probeta 04	97
Tabla 3-30: Temperaturas calculas Probeta 04, Primer Pase.....	97
Tabla 3-31: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 04, y = 0mm.....	99
Tabla 3-32: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 04, y = 1mm.....	100
Tabla 3-33: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 04, y = 2mm.....	101
Tabla 3-34: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 04, y = 3mm.....	102
Tabla 3-35: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 04, y = 4mm.....	103
Tabla 3-36: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 04, y = 5mm.....	104
Tabla 3-37: Dureza Calculada según $t_{8/5}$	107
Tabla 3-38: Probetas Experimentales.....	111
Tabla 3-39: Registro de Datos Ensayo de Dureza, Probeta 01	112
Tabla 3-40: Registro de Datos Ensayo de Dureza, Probeta 02	114
Tabla 3-41: Registro de Datos Ensayo de Dureza, Probeta 03	116
Tabla 3-42: Registro de Datos Ensayo de Dureza, Probeta 04	118
Tabla 3-43: Metalografía Acero Inoxidable Probeta 01	120
Tabla 3-44: Metalografía Acero Inoxidable Probeta 02	122
Tabla 3-45: Metalografía Acero Inoxidable Probeta 03	124
Tabla 3-46: Metalografía Acero Inoxidable Probeta 04	126
Tabla 3-47: Cálculo de Errores	128
Tabla 3-48: Tabla T Student	130

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Micrografía de la estructura martensita.....	9
Figura 1-2: Estructura cristalina martensítica CA6-NM.....	10
Figura 1-3: Diagrama de Fase acero inoxidable ASTM 743 CA-6 NM.....	12
Figura 1-4: Fases presentes en acero inoxidable ASTM CA-6NM	12
Figura 1-5: Zonas presentes en la soldadura	13
Figura 1-6: Diagrama Schaffler.	13
Figura 1-7: Representación de un baño de soldadura en relieve con determinación gráfica de la orientación de los cristales	15
Figura 1-8: Zonas presentes durante el proceso de fusión por soldadura	17
Figura 1-9: Distribución de Potencial eléctrico, (Intensidad de corriente 60A)	22
Figura 1-10: Temperatura en el proceso de soldadura	22
Figura 1-11: Flujo de Calor el proceso de soldadura	23
Figura 1-12: Isoterma de la temperatura en una placa infinita de 10 mm.....	25
Figura 1-13: Ciclo térmico de la soldadura en función del tiempo.....	30
Figura 1-14: Temperatura como función del tiempo y distancia	30
Figura 1-15: Parámetros geométricos del baño de soldadura.	31
Figura 1-16: Distribución de la temperatura y sección transversal.....	32
Figura 1-17: Casos límite de solidificación de aleaciones	33
Figura 1-18: Ciclos térmicos y diagramas de transformación	36
Figura 1-19: Zonas afectadas por el calor en la soldadura multipases.....	37
Figura 1-20: Microestructura constituyentes del metal ZAT	39
Figura 1-21: Diagrama de Temperatura Pico Frente a Tiempo De Enfriamiento.....	39
Figura 1-22: Pases Temper Bead	42
Figura 1-23: Distribución de esfuerzo Residual en una Junta en T de Aluminio	43
Figura 2-1: Placas Soldadas, Probetas 1, 2, 3, y 4	45
Figura 2-2: Soldadura GTAW.....	46
Figura 2-3: Durómetro	47
Figura 3-1: Probetas para el Diseño Experimental	55
Figura 3-2: Diagrama de Schaeffler.....	57
Figura 3-3: Ancho ZAT	66
Figura 3-4: Gráfica Temperatura vs. Distancia x, Probeta 01.....	68

Figura 3-5: Temperatura vs. Distancia por pases, $y = 0$ mm, Probeta 1	69
Figura 3-6: Temperatura vs. Distancia por pases, $y = 1$ mm, Probeta 1	70
Figura 3-7: Temperatura vs. Distancia por pases, $y = 2$ mm, Probeta 1	71
Figura 3-8: Temperatura vs. Distancia por pases, $y = 3$ mm, Probeta 1	72
Figura 3-9: Temperatura vs. Distancia por pases, $y = 4$ mm, Probeta 1	73
Figura 3-10: Temperatura vs. Distancia por pases, $y = 5$ mm, Probeta 1	74
Figura 3-11: Distribución de Temperaturas por Pase, Probeta 1	76
Figura 3-12: Distribución de Temperaturas por Pase, Probeta 1	76
Figura 3-13: Gráfica Temperatura vs. Distancia x , Probeta 02.....	78
Figura 3-14: Temperatura vs. Distancia por pases, $y = 0$ mm, Probeta 2	79
Figura 3-15: Temperatura vs. Distancia por pases, $y = 1$ mm, Probeta 2	80
Figura 3-16: Temperatura vs. Distancia por pases, $y = 2$ mm, Probeta 2	81
Figura 3-17: Temperatura vs. Distancia por pases, $y = 3$ mm, Probeta 2	82
Figura 3-18: Temperatura vs. Distancia por pases, $y = 4$ mm, Probeta 2	83
Figura 3-19: Temperatura vs. Distancia por pases, $y = 5$ mm, Probeta 2	84
Figura 3-20: Distribución de Temperaturas por Pase, Probeta 2	86
Figura 3-21: Distribución de Temperaturas por Pase, Probeta 2	86
Figura 3-22: Gráfica Temperatura vs. Distancia x , Probeta 03.....	88
Figura 3-23: Temperatura vs. Distancia por pases, $y = 0$ mm, Probeta 3	89
Figura 3-24: Temperatura vs. Distancia por pases, $y = 1$ mm, Probeta 3	90
Figura 3-25: Temperatura vs. Distancia por pases, $y = 2$ mm, Probeta 3	91
Figura 3-26: Temperatura vs. Distancia por pases, $y = 3$ mm, Probeta 3	92
Figura 3-27: Temperatura vs. Distancia por pases, $y = 4$ mm, Probeta 3	93
Figura 3-28: Temperatura vs. Distancia por pases, $y = 5$ mm, Probeta 3	94
Figura 3-29: Distribución de Temperaturas por Pase, Probeta 3	96
Figura 3-30: Distribución de Temperaturas por Pase, Probeta 3	96
Figura 3-31: Gráfica Temperatura vs. Distancia x , Probeta 04.....	98
Figura 3-32: Temperatura vs. Distancia por pases, $y = 0$ mm, Probeta 4	99
Figura 3-33: Temperatura vs. Distancia por pases, $y = 1$ mm, Probeta 4	100
Figura 3-34: Temperatura vs. Distancia por pases, $y = 2$ mm, Probeta 4	101
Figura 3-35: Temperatura vs. Distancia por pases, $y = 3$ mm, Probeta 4	102
Figura 3-36: Temperatura vs. Distancia por pases, $y = 4$ mm, Probeta 4	103
Figura 3-37: Temperatura vs. Distancia por pases, $y = 5$ mm, Probeta 4	104

Figura 3-38: Distribución de Temperaturas por Pase, Probeta 4	105
Figura 3-39: Distribución de Temperaturas por Pase, Probeta 4	106
Figura 3-40: Dureza Calculada	107
Figura 3-41: Modelado de Probeta.....	109
Figura 3-42: Mallado en Ansys Research	109
Figura 3-43: Distribución de Temperaturas por DEF Probeta 1 y 2	110
Figura 3-44: Distribución de Temperaturas por DEF Probeta 3 y 4	110
Figura 4-1: Ficha de inspección de Calidad.....	132
Figura 4-2: Rodete Pelton	135
Figura 4-3: Distribución de Cordón de Soldadura	137

RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo de investigación se basa en el cálculo de la temperatura inherente al ciclo de soldadura de Pases de Revenido, proceso utilizado para la Recuperación de Rodetes Pelton. Dicha temperatura establecida por los parámetros de soldadura como Voltaje, Amperaje y velocidad de recorrido son cruciales para la Zona Térmicamente Afectada, misma que puede cambiar su microestructura y aumentar su dureza.

Se han realizado cuatro experimentos en los cuales se combinaron los parámetros de soldadura, y se calculó la temperatura y dureza. La dureza fue comprobada mediante ensayo y la temperatura por medio de un software para análisis por elementos finitos.

Mediante los cálculos, modelado computacional y experimentación se determinó que la microestructura obtenida en la ZAT es martensita revenida, y que el valor de la dureza es similar al del material base, brindando funcionalidad al rodete. Adicionalmente se realiza la comparación de las temperaturas conforme el punto análisis se aleja de la fuente de soldadura.

Palabras Clave: ZAT, Acero inoxidable martensítico, Ciclo de Soldadura

ABSTRACT

The present research work is based on the calculation of the temperature inherent to the welding cycle of the Pass Pass Reheat, a process used for the recovery of Pelton Impellers. This temperature established by the welding parameters such as voltage, amperage and travel speed are crucial for the thermally affected zone, which can change its microstructure and increase its hardness.

Four experiments have been carried out in which the welding parameters were combined, and the temperature and hardness were calculated. The hardness was checked by testing and the temperature was checked by finite element analysis software.

By means of calculations, computational modeling and experimentation, it was determined that the microstructure obtained in the HAZ is tempered martensite, and that the hardness value is similar to that of the base material, providing functionality to the impeller. Additionally, a temperature comparison was performed to confirm that the analysis point is far from the welding source.

Keywords: HAZ, Martensitic stainless steel, Weld Cycle

CAPITULO I

MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes Investigativos

Conservar la energía, mientras se explotan los recursos energéticos renovables, amigables con el medio ambiente es significativo cuando se trata de la generación de energía eléctrica [1]. La generación de energía eléctrica aprovechando los recursos hídricos se ha establecido como la segunda forma de producción de la misma [2]. Las turbinas Pelton son una de las más eficientes turbinas utilizadas en este proceso, están constituidas por un rotor equipados con cangilones en su periferia, las cuales transforman la energía del fluido incidente [3].

El proceso de erosión, que origina el desgaste del material, comienza atacando al sustrato cuya pérdida de masa en primera instancia no es significativa, sin embargo al continuar el proceso se forman ondulaciones que cambian drásticamente la forma del perfil, éstas a su vez facilitan la formación de grietas y picaduras superficiales [4].

Del análisis de las obras de varios autores se puede concluir que los procesos de reparación para componentes críticos del proceso de generación de energía eléctrica, pueden traer consigo un incremento en la vida útil de operación de los mismos y por consiguiente una mejora en la disponibilidad en el tiempo de generación, presentando también una disminución en los tiempos muertos por mantenimiento y reparación.

La investigación desarrollada por Adbulkaremm et al. manifiesta que los tratamientos térmicos de soldadura son utilizados para recuperar las propiedades mecánicas y templar la microestructura [5], sin embargo, la aplicación de soldadura desencadena cambios en la microestructuras, causados por la tasa de transferencia de calor, principalmente en la zona térmicamente afectada (ZAT), provocando que cuando la turbina esté en funcionamiento, exista un desgaste acelerado en el área cercana al cordón de soldadura, que desencadene en la disminución de la vida útil del elemento mecánico, además de elevar los gastos por mantenimientos. El autor Osorio establece en su investigación que los proceso térmicos post soldadura, entre ellos la

soldadura de revenido, son una opción para disminuir los esfuerzos residuales y recobrar la microestructura en la Zona Térmicamente Afectada. La soldadura de revenido, es un tratamiento térmico muy utilizados en aceros inoxidable martensíticos para obtener martensita revenida, que proporcionará al material propiedades mecánicas óptimas para su funcionamiento [6].

Las investigaciones en el campo de la soldadura se han desarrollado en los últimos años empleados los métodos de modelación numérica, los mismos que facilitan la interpretación de resultados, al alterar las variables de estudio. En la actualidad, los métodos de modelación, han permitido conocer más a fondo los fenómenos físicos, los cuales pueden ser hidrodinámicos, térmicos, mecánicos, etc, lo que facilita la adquisición de conocimientos que permitirán adaptar diseños para optimizar la eficiencia [7]. En el campo de la soldadura se han desarrollado varias investigaciones científicas, mismas que contribuyen al desarrollo y/o mejora de procesos de manufactura los optimicen, entre las que se encuentran:

- Un estudio realizado en la ciudad de Medellín – Colombia, determinó que los requerimientos de voltaje, amperaje, del proceso de soldadura de revenido pulsado, son menores que otros procesos por aspersion, además de obtenerse un cordón de soldadura con mayor altura y mayor ancho [8].
- En el año 2016 por los autores Lina Yu, Kazuyoshi Saida, Shinro Hirano, Naoki Chigusa, y Masahito Mochizuki, establecieron que el tratamiento de soldadura de revenido es uno de los más efectivos cuando se refiere a corregir las afectaciones mecánicas del material, después de su reparación, al presentar un estudio experimental de la soldadura, obteniendo predicciones de dureza mediante un modelo computacional, cuyas predicciones fueron acordes a las mediciones realizadas en laboratorio [9].
- El estudio denominado Numerical Model of Multi-pass Repair Process by Temper Bead Welding, se basa un modelo numérico para calcular el acoplamiento entre la formación del cordón de soldadura y la conducción térmica durante la soldadura, comparando los resultados analíticos con los resultados experimentales, [10].

- Jorge Guerra-Álvarez et al, realizaron el análisis del comportamiento de la dureza en la zona afectada térmicamente durante soldadura, concluyendo que este método recupera las propiedades mecánicas del sustrato. [11].
- Juan Auz, establece que para los aceros martensíticos, la soldadura de revenido, permite alcanzar el completo revenido de la martensita fresca y un alto contenido de austenita retenida logrando así reducir y homogenizar la dureza y mejorar la ductilidad y tenacidad del elemento soldado, además que los parámetros de control que homogenizan la microestructura y proporcionan las mejores propiedades mecánicas son la temperatura de revenido y tiempo del mismo [12].

Sintetizando las investigaciones enumeradas anteriormente, se puede concluir que el proceso de soldadura de revenido, recupera las propiedades mecánicas del material base, permitiendo la perpetuidad de su vida útil, además que los métodos de modelado, facilita la optimización de técnicas al permitir alterar variables sin restricciones, ofreciendo al usuario la oportunidad de examinar los resultados, sin afectar la materia prima. Los análisis numéricos para determinar el comportamiento mecánico en la zona térmicamente afectada en aceros martensíticos no se han desarrollado, siendo éste un material ampliamente usado en la industria, especialmente en la industria eléctrica, por lo cual el desarrollo del modelado viabilizará la técnica óptima de soldadura que proveerá al material la suficiente resistencia para su funcionamiento adecuado.

La mayoría de los ríos en la Cordillera de los Andes poseen un alto contenido de sedimentos, los cuales producen hidroerosión, que a su vez afecta el perfil de la turbina, el mismo tiene un papel importante en la determinación de la eficiencia de la turbina. Estudios realizados han identificado tres parámetros responsables de la erosión en las turbinas Pelton los cuales son: concentración de sedimentos, tamaño, características del material, y velocidad del fluido [13].

La Agencia de Regulación y Control de Electricidad, ARCONEL, establece en su boletín del agosto del 2019, que el 60.84% de la potencia nominal en generación de energía eléctrica es producida por energía renovable, siendo el 58.53% fuente de la energía hídrica [14]. Para cumplir lo establecido en el cambio de matriz energética, el

cual menciona que para el año 2021 el 93.55% de la energía eléctrica disponible provenga de las centrales de generación Hidroeléctrica, se han desarrollado procesos de ingeniería de recuperación, en los cuales se investiga y evalúa la factibilidad para desarrollar procesos de recuperación de rodets, o elementos mecánicos de turbomáquinas de generación eléctrica.

En el Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas, parte de la Corporación Eléctrica del Ecuador, CELEC EP, cumple con las políticas y está alineado a los requerimientos de la matriz productiva, por lo que en su estructura funcional realiza nuevos procesos de recuperación y manufactura, caracterizando por tener responsabilidad social y ambiental. El CIRT tiene gran impacto en el sector eléctrico nacional, ya que aquí se efectúan los mantenimientos, provocando una disminución de costos y tiempos, conociendo que anteriormente los procesos de reparación requerían el traslado de las turbinas a Unidades de Negocios Internacionales [15].

Actualmente el CIRT, posee las máquinas y equipos para el desarrollo de procesos de manufactura enmarcados en la ingeniería de diseño y optimización, lo cual representará un ahorro económico del 60%, del precio al enviarlos a talleres de reparación internacionales. (CIRT, 2018). Para el 28 de junio del 2019 hubo un ahorro de 12.5 millones de dólares por concepto de reparación de turbinas hidráulicas [17].

De entrevistas realizadas al personal que actualmente trabaja en el CIRT, se obtuvo la información de los procesos de recuperación de turbinas, además se comentó que debido al poco tiempo de práctica aún no se han desarrolla todas las técnicas para recuperación de turbinas, señalando problemas, entre ellos, en el proceso de recuperación de los rodets, y al ponerlos en marcha, estos alertan a los sistemas de control y monitoreo, antes de lo planificado, identificando que existe un desgaste acelerado en el material base en la zona ZAT, y en estudios experimentales se ha determinado que en la zona ZAT existe una dureza superior a la del sustrato, además que la estructura cristalina se transformó en martensita, por lo cual es imperativo el desarrollo de un proceso de manufactura que restaure las propiedades mecánicas, para perdurar el funcionamiento del rotor.

1.2. Problema

1.3. El deterioro de rodets hidráulicos es un problema en el proceso de generación de energía eléctrica ya que causa reducciones en la eficiencia. Una vez el rodete se encuentra suficientemente deteriorado, se realiza la reparación mediante la reconstrucción de los perfiles hidráulicos por medio de soldadura. Sin embargo, como los rodets son altamente exigidos durante su funcionamiento, se pretende que después de la reparación, la microestructura del material recupere en lo posible las condiciones y propiedades originales [6], tanto en el material base como en la zona cercana al cordón del soldadura, conocida como ZAT, ya que debido a su calentamiento hasta formar hierro delta, resulta con microestructura y propiedades mecánicas diferentes a las originales, lo que provoca un desgaste apresurado del material, por consiguiente, incremento en los costos de mantenimiento.

1.4. Objeto

Soldadura de revenido

1.5. Campo

Modelado de soldadura

1.6. Justificación

La presente investigación brinda un modelo numérico, en el cual el usuario puede, modificando variables de entrada, obtener los mejores resultados en dureza en el proceso de recuperación por soldadura de revenido, conociendo que, si la dureza en la zona ZAT es muy alta, el material es frágil en la zona, por lo cual se desgasta a una tasa mayor.

El desarrollo de un modelo numérico de formación de cordón y distribución de calor en la soldadura de pases de revenido para el proceso de reparación de un rodete tipo Pelton será la base científica para la realización de futuras investigaciones, al

establecer los métodos y parámetros para la optimización del proceso de soldadura de revenido.

Además, este estudio, brinda la posibilidad de encontrar un método de encontrar un método de manufactura, en el campo de reparación de rodets tipos Pelton, que disminuya tiempos de mantenimiento y por ende costos, además que al aplicar la soldadura de revenido se homogeniza la estructura cristalina y propiedades mecánicas en el elemento, que permite la perpetuidad de la vida útil del rodete.

1.7. Objetivos

1.7.1. Objetivo General

Modelar numéricamente el proceso de soldadura de revenido y distribución de calor en del proceso de reparación de un Rodete tipo Pelton.

1.7.2. Objetivos Específicos

- Realizar una búsqueda bibliográfica acerca de investigaciones efectuadas en la soldadura de revenido, y modelados numéricos de procesos de soldadura.
- Evaluar experimentalmente las propiedades mecánicas en el sustrato después del proceso de soldadura de revenido.
- Modelar numéricamente el proceso de soldadura de pases de revenido para el proceso de reparación de un Rodete tipo Pelton.
- Desarrollar una propuesta sobre el proceso de manufactura más adecuado para la recuperación de rodets tipo Pelton.

1.8. Hipótesis

Un modelo numérico del proceso de soldadura de revenido en los rodets tipo Pelton, permitirá obtener propiedades mecánicas en la zona ZAT similares a las del sustrato.

1.8.1. Señalamiento de Variables

Variable Independiente.

El modelado modelo térmico y de formación de cordón la soldadura de pases de revenido

Variable Dependiente

Propiedades mecánicas en la zona térmicamente afectada del sustrato.

1.9. Fundamentación Teórica

1.9.1. Simbología

a : difusividad térmica [m^2s^{-1}]

C_p : Capacidad calórica volumétrica [Jm^3K^{-1}]

D : Coeficiente de Difusión térmica [m^2s^{-1}]

e : número de Euler (2.718282....)

H : dureza

h : espesor [m]

I : Intensidad de Corriente [A]

Q : Flujo de calor h : espesor [J]

Q_0 : Flujo de calor inicial [J]

Q_1 : Flujo de calor por unidad de longitud [Jm^{-1}]

q: Potencia térmica [W]

To: Temperatura inicial [K]

Ts; Temperatura superficial del cuerpo [K]

t: Tiempo [s]

t_{8/5}: Tiempo de enfriamiento de 1073 K (800°C) a 773 K (500°C)

V. Voltaje (V)

v: avance de soldadura (m s⁻¹)

λ: conductividad térmica [W m⁻¹ K⁻¹]

ρ: densidad [g/m³]

1.9.2. Acero inoxidable martensítico

Posee un contenido mayor al 10.5% de cromo además de otros elementos estabilizadores como carbono, nitrógeno, níquel y magnesio que facilitan la expansión de la fase austenita favoreciendo los tratamientos térmicos.

Los aceros inoxidable se caracterizan por tener una alta resistencia a la corrosión en una variedad de ambientes. La características de los aceros inoxidable martensíticos es que la martensita es el principal microconstituyente, y la adición de diferentes elementos aleantes producen una alteración drástica en el diagrama de fase Hierro Carbono [18]. Son ampliamente usados en la manufactura de turbinas, herramientas, rodamientos, herramientas quirúrgicas ortopédicas, aplicaciones en las que se requiere que el material posee una superficie mejorada, similar a la obtenida en el proceso de nitruración.

La martensita es un microconstituyente presente en las aleaciones de acero, que se forma al enfriarse rápidamente a una temperatura relativamente baja. Es una estructura

monofásica sin equilibrio, que resulta de la transformación sin difusión de austenita. La transformación de fase a martensita ocurre cuando la velocidad de enfriamiento es tan rápida como para prevenir la difusión del carbono, la misma que produciría la formación de ferrita. Como la transformación martensítica no implica difusión, ocurre casi instantáneamente; los granos de martensita se nuclean y crecen a un ritmo muy rápido [19].

La apariencia de la martensita mostrada en la Figura 1-1 varía con el contenido de carbono. Con el aumento del carbono la martensita se vuelve más fina, cambiando de listón a la morfología de placa y la cantidad de austenita residual retenida incrementa.



Figura 1-1: Micrografía de la estructura martensita. La forma de aguja los granos son la fase de martensita, y las regiones blancas son austenitas que no pudieron transformarse durante el enfriamiento rápido.[19]

Debido a la presencia de martensita poseen una alta resistencia, adicionalmente la forma de la martensita depende del contenido de carbono siendo más fina a un alto contenido. En la figura 1-2 se puede observar la estructura cristalina martensítica de una fundición grado CA6 -NM.

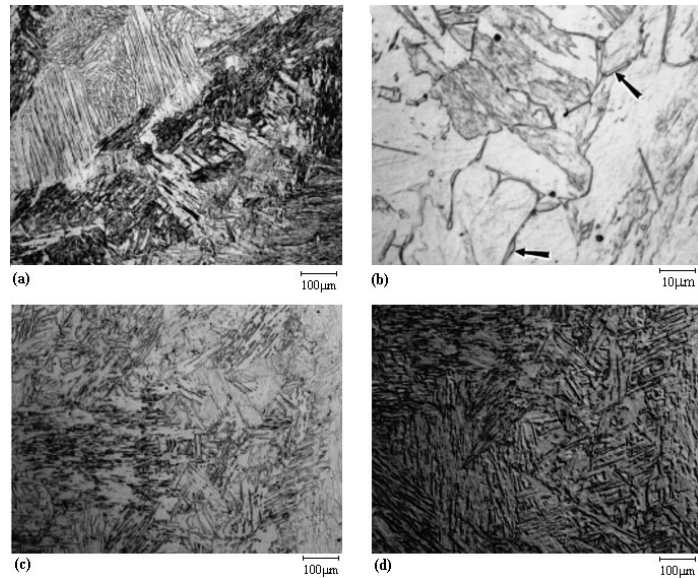


Figura 1-2: Estructura cristalina martensítica CA6-NM [20]

1.9.3. Acero Inoxidable Martensítico ASTM A743 Grado CA6-NM

La Asociación Americana de Ensayos de Materiales ASTM por sus siglas en inglés (American Society of Testing Materiales), designa al acero ASTM A743 como un tipo de acero martensítico de bajo carbono ampliamente usado en la manufactura de partes de turbinas hidráulicas. Este tipo de acero tienen una compensación de níquel para expandir la zona austenítica. Posee excelentes propiedades mecánicas y resistencia al impacto [21].

El código CA6NM, se debe a la nominación del High Alloy Product of the Steel Founder, Society of America, la especificación técnica detalla el significado de la letra C, la cual señala que es un material resistente a la corrosión a temperaturas de trabajo inferiores a 650°C que para este tipo de acero se necesita un tratamiento térmico con una temperatura mínima de 1010°C. El carácter se refiere a los contenidos de cromo y níquel presentes en la aleación, el número 6 indica el contenido de carbono al multiplicarlo por 6, los demás caracteres denotan componentes presentes como el níquel y molibdeno [12].

La composición química según la norma ASTM A743, se muestra en la Tabla 1.1. en donde se observa que los principales componentes presentes son cromo, níquel.

Tabla 1-1: Composición química nominal del acero ASTM A743 -CA6-NM

Carbono máx.	Manganeso máx.	Silicio máx.	Fósforo máx.	Azufre máx.	Cromo	Níquel	Molibdeno
0.06	1.00	1.00	0.04	0.03	11.5-14.00	3.5 – 4.5	0.4 - 1

Fuente: [22]

La norma proporciona datos de las propiedades mecánicas en las que se puede encontrar:

- *Esfuerzo de Tracción:* 110 kpsi (755 MPa)
- *Límite Elástico:* 80 kpsi (550 MPa)
- *Porcentaje de Elongación 2 pulgadas (50 mm):* 15%
- *Porcentaje de Reducción de área:* 35% [22]
- *Dureza Brinell:* 250- 270 [23]

Las fases presentes en este tipo de acero son martensita, y por su bajo contenido de carbono la estructura es BCC, ferrita delta y alfa con estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo, la ferrita alfa forma parte de la austenita, este tipo de estructura empobrece las propiedades mecánicas. Adicionalmente está conformado por austenita revenida, con estructura cristalina cúbica centrada en las caras [24].

El diagrama de fases del acero inoxidable A743 grado CA6-NM, indicada en la Figura 1-3, se presenta en la figura a continuación, y en el cual se observan las fases presentes en la aleación. La primera solidificación presenta es ferrita delta más líquido. Se llega a una totalidad de ferrita delta en el intervalo de 1500°C a 1300°C, subsecuentemente se obtiene la fase austenita γ en el rango de temperaturas de 1300°C a 1230°C, en una condición óptima de equilibrio de fases. Al continuar con el proceso de enfriamiento se obtiene la transformación $\gamma \rightarrow \alpha'$, reacción martensítica no difusional. Las fases presentes se pueden observar en la Figura 1-4 [12].

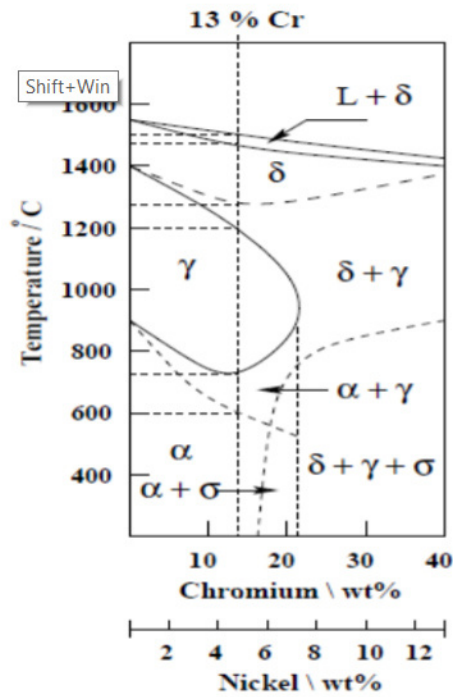


Figura 1-3: Diagrama de Fase acero inoxidable ASTM 743 CA-6 NM [24]

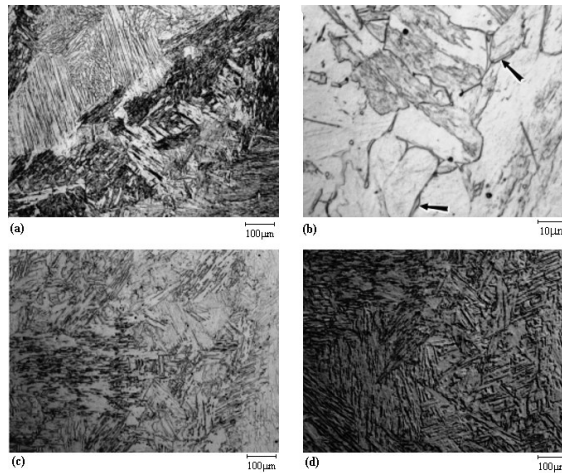


Figura 1-4: Fases presentes en acero inoxidable ASTM CA-6NM [12]

1.9.4. Soldadura para Aceros Inoxidable Martensíticos

El proceso de soldadura es la unión de metales, usualmente metales o termoplásticos, (los cuales se sueldan por coalescencia). Se lo realiza mediante de la fundición de las piezas de y trabajo y añadiendo un material de aporte que va a hacer las veces de relleno el cual al enfriarse se convierte en una unión muy fuerte. Puede o no aplicarse una presión externa.

Debido a la transferencia de calor se forman diferentes zonas, observadas en la Figura 1-5, zonas presentes en la soldadura, en las cuales se tiene, zona de penetración, en la cual se deposita el material de aporte, zona de fusión, en la que ocurre cambio metalúrgico, obteniéndose granos finos y gruesos del material debido a las transformaciones del sustrato.

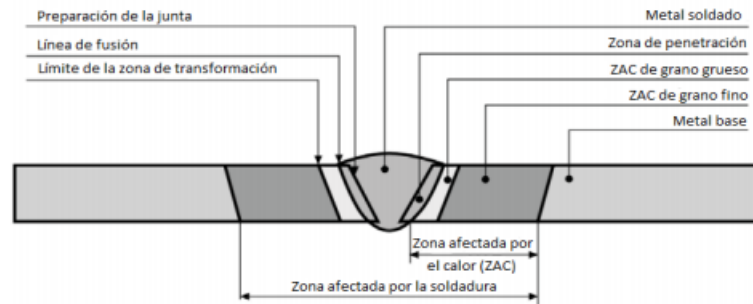


Figura 1-5: Zonas presentes en la soldadura[25]

Durante el proceso de soldadura los aceros inoxidable martensíticos son propensos a la producción de martensita en el cordón de soldadura como en la zona térmicamente afectada. En el diagrama Schaeffler, Figura 1-6, se observan las fases presentes en los aceros inoxidable, las cuales dependen del contenido de cromo y níquel cuyo cálculo se presenta en las ecuaciones a continuación:

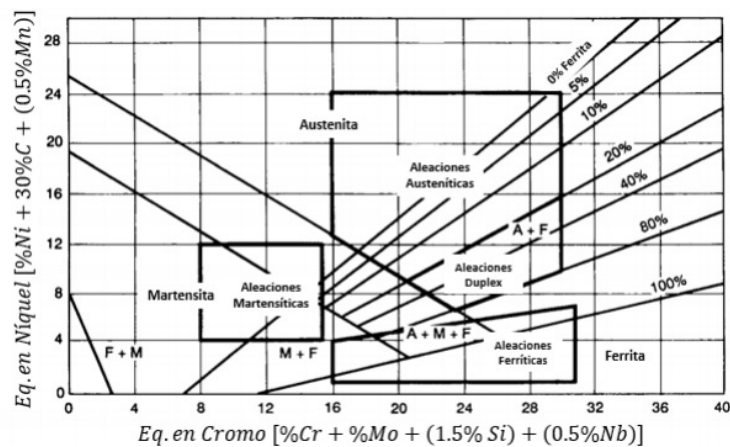


Figura 1-6: Diagrama Schaeffler. [25]

$$\% \text{ Ni equivalente} = \% \text{ Ni} + 30\% \text{ C} + 0.5\% \text{ Mn}$$

Ecuación 1-1

$$\% \text{ Cr equivalente} = \% \text{ Cr} + \% \text{ Mo} + 1.5 \% \text{ Si} + 0.5\% \text{ Nb}$$

Ecuación 1-2

Una vez calculados los porcentajes de níquel y cromo equivalente, se obtiene un punto, el cual representa el estado de la mezcla solidificada final a obtenerse en el proceso de soldadura. En aceros inoxidable es posible encontrar cuatro diferentes estados de solidificación:

- **Solidificación A:** la microestructura obtenida es austenítica, que puede ser celular o dendrítica.
- **Solidificación AF:** después de la formación de la microestructura austenítica, se forma ferrita, debido a la presencia de cromo y molibdeno.
- **Solidificación AF:** existe formación de ferrita en la fase final o austenita en la fase final. La formación de austenita se debe a una reacción peritética - eutéctica.
- **Solidificación tipo F:** se obtienen estructura cristalina ferrita delta.

La zona martensítica tendrá una predisposición a la fisuración que puede causar fracturas convirtiendo inoperante al elemento mecánico. La formación de martensita está relacionada proporcionalmente con el contenido de carbono. Para la disminución de este efecto se efectúa un precalentamiento en el elemento a soldar, siendo publicado por diversos autores que el rango de temperatura fluctúa entre 200 a 300°C (cuya temperatura deberá incrementar con el espesor del material base) sin embargo, la posibilidad de formación de martensita continúa pese al precalentamiento, es por ello que se emplea un post calentamiento para alivio de tensiones, la cual tiene un rango de 650° a 750°C [26].

1.9.5. Metalurgia de la Soldadura en Aceros Inoxidables Martensíticos

En la formación de aceros, desde la manufactura de lingotes, trabajos en frío y caliente, existen procesos de recristalización, homogeneización y eliminación de precipitación que constituyen operaciones positivas para el material base. En el caso de la soldadura, las posibilidades de eliminar estas imperfecciones se ven limitadas debido a los componentes de soldadura como la alta temperatura de trabajo. En condiciones de trabajo no tratadas, el metal de soldadura posee una estructura de solidificación expuesta a un ciclo corto de recalentamiento, cada vez que se deposita una nueva capa

Los metales de soldadura de acero inoxidable pueden solidificarse desde el estado líquido bien en forma de ferrita primaria δ o de cristales primarios γ . Si una aleación se encuentra en el diagrama de constitución ternaria en la zona de la ranura eutéctica y toca durante la solidificación el sector trifásico ($L + \delta + \gamma$), puede formarse una mezcla de cristales primarios δ e γ . Si la solidificación tiene lugar en cristales primarios δ , una gran parte de estas aleaciones experimentará una transformación secundaria durante el enfriamiento posterior. Si la solidificación tiene lugar en cristales primarios γ , la estructura austenítica se mantendrá en la mayoría de los casos hasta la temperatura ambiente. En el rango superior de temperaturas, es decir, relativamente cerca de la zona de solidificación, los cristales primarios de γ formados a partir de la masa fundida se alteran normalmente por recristalización, es decir, se forman nuevos límites de grano de austenita [29].

Los aceros martensíticos de bajo contenido en carbono y las fundiciones de acero siempre se templean y revenen. Dependiendo del grado, el enfriamiento suele tener lugar en el rango de 950-1050° C con un posterior revenido a 600° C. Algunos de los aceros martensíticos de bajo carbono con contenidos de cromo superiores al 14% también pueden endurecerse por precipitación. Estos aceros son recocidos por disolución a temperaturas de 1000-1050° C y luego endurecidos por precipitación, dependiendo del grado, en el rango de 450-580° C [30].

1.9.6. Zona Térmicamente Afectada

Durante el proceso de soldadura existe el calor suficiente para formar la unión entre materiales, o fundir el material de aporte, debido a esto la zona adyacente a la región de soldadura experimenta alteraciones en sus estructuras cristalinas y propiedades mecánicas, dicha zona se conoce como Zona Térmica Afectada, la cual se ilustra en la Figura 1-8.

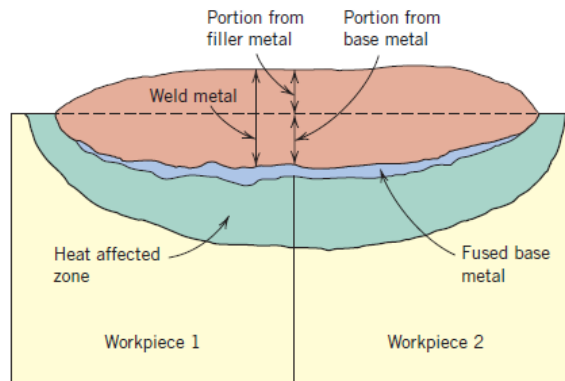


Figura 1-8: Zonas presentes durante el proceso de fusión por soldadura [19]

Si el sustrato ha sido previamente trabajado en frío, la zona térmicamente afectada experimenta recristalización y crecimiento de los granos, y en consecuencia disminución de la dureza, resistencia y tenacidad. Una vez se enfría el material base se pueden formar tensiones residuales. Generalmente, en el acero aleado, como producto de microestructura, se obtiene martensita en esta área y, además, en el acero inoxidable, se sensibilizan y son propensas a la corrosión intergranular.

A diferencia del tratamiento térmico realizado a temperaturas definidas, el material de la zona afectada por el calor se calienta durante la soldadura a una variedad de temperaturas que van desde la temperatura ambiente hasta el rango de fusión de la aleación en cuestión. La duración del ciclo de calentamiento y la extensión de la zona afectada por el calor dependen principalmente de los parámetros de soldadura y del grosor del material, y la velocidad de enfriamiento viene determinada en gran medida por el aporte de calor y por el grosor del material.

Si las soldaduras reciben el mismo tratamiento térmico que el acero inoxidable de origen, es decir, recocido por disolución y a veces templado, se comportan en la mayoría de los casos con respecto a la precipitación de carburos y la susceptibilidad a la corrosión intergranular de la misma manera que un grado de acero de análisis similar. En estos casos, los fenómenos se aplican también al metal de soldadura y a la ZAT. Las únicas excepciones son las soldaduras con fuertes segregaciones y zonas afectadas por el calor de grano muy grueso, como puede ocurrir al soldar aceros inoxidables ferríticos o, más generalmente, en procesos de soldadura con aportes de

calor muy elevados, por ejemplo, la soldadura por electroescoria. Las segregaciones que se producen en estas circunstancias sólo pueden eliminarse mediante el recocido por difusión y no por el recocido por disolución.

1.9.7. Proceso de Soldadura para Aceros Inoxidables Martensíticos

Una de las principales ventajas de los aceros martensíticos al cromo-níquel de bajo contenido en carbono, en comparación con los aceros ferríticos al cromo, es su buena soldabilidad. La soldabilidad de los aceros martensíticos al carbono y de los metales de soldadura puede caracterizarse por tres rasgos particulares:

- La formación de martensita resistente de bajo contenido en carbono en la ZAT y en el metal de soldadura, que reduce en gran medida la sensibilidad al agrietamiento en frío.
- El bajo contenido de ferrita delta, que normalmente se encuentra en el rango de 1-4% para el metal de soldadura. Así, la tendencia a la formación de grano grueso se reduce en gran medida.
- La sensibilidad al hidrógeno relativamente fuerte de la estructura martensítica en la ZAT y el metal de soldadura.
- La soldadura sólo debe realizarse con un metal de aportación adecuado que contenga un máximo de 0,040% de carbono, aproximadamente un 12% de cromo y aproximadamente un 4 o 6% de níquel, lo que da un contenido máximo de 5% de ferrita delta en el metal de soldadura.
- El contenido de hidrógeno difusible (HDM según ISO 3690 y A WS A 4.3-86) depositado en el metal de soldadura debe ser inferior a 5 ml/100g. Los electrodos revestidos y los fundentes de soldadura por arco sumergido deben volverse a calentar de acuerdo con las instrucciones del fabricante o al menos a 300° C durante dos horas como mínimo para obtener el nivel de hidrógeno requerido.
- Las piezas con espesores de pared elevados (superiores a 20 mm) deben precalentarse antes de la soldadura a unos 100° C.
- La mejor resistencia a la fisuración se consigue cuando las operaciones de soldadura se realizan por debajo de la temperatura de transformación en

martensita del acero utilizado para la pieza, con una temperatura entre pasadas de entre 100 y 150° C. De este modo, la estructura de cada cordón de soldadura se transforma en gran medida de austenita a martensita y se temple durante la soldadura mediante las siguientes pasadas. La transformación en martensita de un cordón de soldadura puede seguirse con la ayuda de un dispositivo de medición de ferrita o, más sencillamente, utilizando una pequeña barra magnética (la martensita es ferromagnética, pero la austenita) [31]. Este método de soldadura debería utilizarse generalmente para todos los componentes soldados que no vayan a ser templados después de la soldadura.

- Si se requieren valores de impacto más elevados, es necesario un tratamiento térmico posterior a la soldadura, como el revenido o el temple y revenido. En las aplicaciones prácticas, por ejemplo, cuando se utilizan procesos de soldadura de alta deposición (procesos de alta corriente SAW o GTA W) o en el caso de la soldadura de reparación de piezas fundidas de acero de paredes gruesas, a veces es práctica común soldar con una alta temperatura entre pasadas en el rango de 250-300° C, es decir, por encima de la temperatura de transformación en martensita del acero. En estos casos, es absolutamente necesario transformar la estructura austenítica de la ZAT y del metal de soldadura completamente en martensita de nuevo mediante el enfriamiento controlado de la pieza hasta unos 100° C antes de iniciar cualquier tratamiento térmico posterior a la soldadura. Sin embargo, debe evitarse el enfriamiento completo de los componentes soldados hasta la temperatura ambiente, especialmente en el caso de componentes de paredes gruesas o cuando las temperaturas ambiente son muy bajas. El mejor procedimiento es iniciar el tratamiento térmico posterior a la soldadura inmediatamente después de la finalización de la transformación martensítica.

Los aceros martensíticos de bajo carbono endurecidos por precipitación se sueldan muy raramente. Para conseguir las mismas propiedades en el metal de soldadura y en el metal base, a veces puede ser necesario someter la pieza soldada a un tratamiento térmico completo consistente en el recocido de disolución, el revenido y el envejecimiento. La soldadura debe realizarse con metales de aportación adecuados. En general, se aplican las mismas recomendaciones para la soldadura de aceros de

endurecimiento por precipitación que las indicadas anteriormente, pero no se pueden establecer reglas generales. Es conveniente considerar cada caso por separado y decidir qué procedimiento de soldadura y tratamiento térmico emplear para adaptarse a las circunstancias específicas [32].

1.9.8. Soldadura por Arco con Electrodo de Tungsteno con Protección Gaseosa Inerte

En términos de volumen de aplicación, la soldadura por arco supera a todos los demás métodos de soldadura. Un arco de soldadura representa una descarga eléctrica estable a través de un espacio de gas. La corriente pasa entre dos electrodos. Un electrodo positivo se llama ánodo y uno negativo se llama cátodo. Durante la soldadura con corriente alterna, la polaridad de los electrodos cambia junto con la frecuencia de la fuente de alimentación. Los arcos de soldadura típicos tienen una corriente de 1 a 1500 A con una tensión de 8 a 50 V.

La intensidad del campo eléctrico en el arco es muy desigual. En las regiones estrechas del cátodo y del ánodo es en órdenes de magnitud mayor que en la columna del arco, donde no supera varios voltios por un milímetro, por lo tanto, la densidad volumétrica del calor que se genera en el arco es muy desigual, lo que da lugar a una temperatura no uniforme.

1.9.9. Transferencia de Calor en la Soldadura

La temperatura es una cantidad física que caracteriza el grado de calor de un cuerpo. Cuando un sistema está en equilibrio termodinámico, la temperatura de todos los cuerpos que conforman el sistema es la misma.

Durante el proceso de soldadura la energía implicada es alta, teniendo una alta afectación sobre los materiales, considerando que la temperatura de fusión de los electrodos es superior a los 1400°C [33]. Lo anterior ocasiona que las microestructuras no sean iguales a las obtenidas después de un tratamiento térmico, que afecta

drásticamente a la ZAT, entendiendo también que existe una elevadas velocidades de difusión que ocasionan crecimiento granular. Una vez concluido el proceso de soldadura, en la mayoría de casos se deja enfriar a temperatura ambiente, dando origen a la formación de granos dendríticos [34].

En términos de volumen de aplicación, la soldadura por arco supera a todos los demás métodos de soldadura. Un arco de soldadura representa una descarga eléctrica estable a través de un espacio de gas. La corriente pasa entre dos electrodos. Un electrodo positivo se llama ánodo y uno negativo se llama cátodo. Durante la soldadura con corriente alterna, la polaridad de los electrodos cambia junto con la frecuencia de la fuente de alimentación. Los arcos de soldadura típicos tienen una corriente de 1 a 1500 A con una tensión de 8 a 50 V. La intensidad del campo eléctrico en el arco es muy desigual [31].

En las regiones estrechas del cátodo y del ánodo es en órdenes de magnitud mayor que en la columna del arco, donde no supera varios voltios por un milímetro. Por lo tanto, la densidad volumétrica del calor que se genera en el arco es muy desigual, lo que da lugar a una temperatura no uniforme con grandes gradientes

El tungsteno y el carbono se utilizan como electrodos no consumibles. El molibdeno y el tántalo también son refractarios, pero se utilizan en casos excepcionales. La función de trabajo (la menor energía necesaria para extraer un electrón del metal) del tungsteno toriado es menor que la del tungsteno puro. Por lo tanto, la caída de tensión en el cátodo y, en consecuencia, la temperatura de la región catódica son relativamente bajas. La punta del electrodo no se funde y mantiene su forma inicial afilada. El estado del arco (campo de temperatura, densidad del plasma, potencial eléctrico, velocidad, presión, densidad de corriente, etc.) depende del material de los electrodos, del entorno del gas (composición y presión), de la distancia entre los electrodos, de la corriente y de muchos otros factores, como se observa en la Figura 1-9 [35].

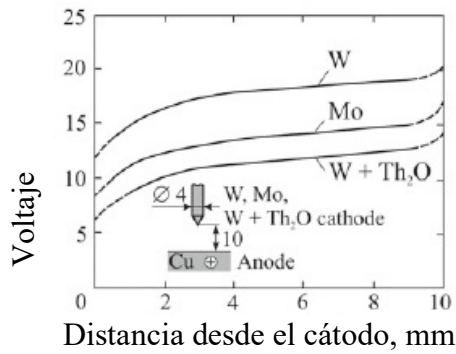


Figura 1-9: Distribución de Potencial eléctrico, (Intensidad de corriente 60A) [35]

Considerando el arco axisimétrico estable, que inflama en argón entre un electrodo de tungsteno toriado y un ánodo de cobre refrigerado por agua . El campo de temperatura del ánodo depende del estado del arco, que a su vez depende de las condiciones de las superficies de contacto arco-ánodo y arco-cátodo.

Al resolver este complejo problema se distinguen cinco regiones: cátodo, región catódica del arco, columna del arco, región anódica del arco y ánodo. Es necesario considerar los complicados fenómenos físicos en la región del electrodo (corriente electrónica y corriente iónica, conductividad térmica, etc.) y los efectos superficiales en los electrodos. La conductividad térmica y el calentamiento eléctrico se consideran en los electrodos. Hay que establecer algunas condiciones de contorno relevantes. El problema formulado es fuertemente no lineal y sólo puede resolverse de forma numérica. Las condiciones de contorno en los límites del cátodo y del arco-ánodo se finalizan mediante un método de iteración (Figura 1-10).

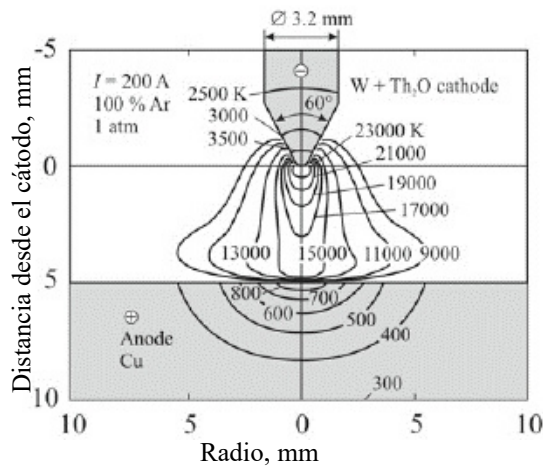


Figura 1-10: Temperatura en el proceso de soldadura [35]

Un resultado importante de la solución del problema es la distribución del flujo de calor desde el arco hasta el ánodo y sus componentes, (como se puede observar en la Figura 1-11). En cuanto a su forma, la curva de distribución radial del flujo de calor total se aproxima a una curva normal. Se observa que, en la proximidad del eje del arco, la entrada de energía de los electrones en el flujo de calor en el ánodo es la principal. El ánodo se calienta considerablemente debido a la conducción de calor, especialmente cuando la corriente es débil.

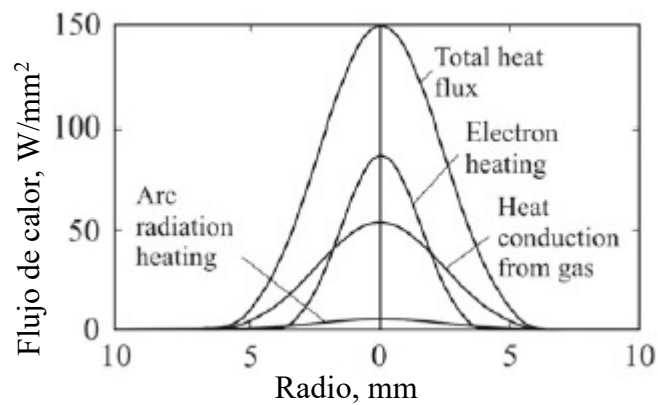


Figura 1-11: Flujo de Calor el proceso de soldadura

Se debe destacar que para calcular el campo de temperatura de la pieza (ánodo), hay que conocer la distribución del flujo de calor desde el arco a la pieza. El cálculo del flujo de calor del arco a la pieza se hace mucho más difícil si se considera la reacción del metal líquido del baño de soldadura durante la fusión [36].

El calor en un cuerpo sólido se conduce desde lugares con una temperatura más alta a lugares con una temperatura más baja por medio de la conducción de calor molecular.

Según las investigaciones de varios autores la ecuación de Rosenthal (quien basó sus estudios en la predicción del comportamiento de la gota de soldadura) describe el flujo de calor durante la soldadura:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t}(c_p T) + \rho v \nabla(c_p T) = \nabla(k \nabla T) + s \quad \text{Ecuación 1-3} \quad [37]$$

Para la solución de la ecuación se toman en cuenta las siguientes consideraciones:

- El gradiente de temperatura es un gradiente cuya dirección es a lo largo de la normal de la isoterma, dirección de incremento de la temperatura. (Figura 1-12)
- La condición inicial se determina estableciendo la ley de distribución de la temperatura dentro del cuerpo en el momento inicial ($t = 0$)

$$T(x, y, z, 0) = f(x, y, z) \quad \text{Ecuación 1-4} \quad [38]$$

En soldadura es común asumir una distribución uniforme de temperatura con tiempo inicial 0, como T_0 , como temperatura cero y es un punto referencial.

- Las condiciones de contorno indican la interacción de la superficie del cuerpo con el medio ambiente. En el cálculo de los procesos de soldadura es habitual utilizar las llamadas condiciones de contorno de primera, segunda, tercera y cuarta clase de toda la diversidad en el cálculo de procesos de soldadura.
- *Condición de frontera de primer tipo:* Implica prescribir la distribución de la temperatura a lo largo de la superficie en cualquier momento. En la práctica de la soldadura, la condición del primer tipo es algo raro. Se utiliza, por ejemplo, para describir el contacto del cuerpo con abrazaderas masivas de disipación de calor.
- *Condición de frontera de segundo tipo:* Implica prescribir la densidad del flujo de calor para cada punto límite del cuerpo S como una función temporal:

$$q = \psi(x, y, z, t) \quad \text{Ecuación 1-5} \quad [38]$$

Cuando se calculan los procesos de calor en la soldadura de cuerpos limitados, la última condición se utiliza si la transferencia de calor al medio ambiente es insignificante en comparación con los flujos de calor en el interior del cuerpo [38].

- *Condición de frontera de tercer tipo:* Implica describir el flujo de calor a través de la superficie para ser proporcional a la diferencia de temperatura entre la superficie del cuerpo T_s , y la temperatura media ambiental T_∞ , acorde con la Ley de Newton.

$$q = \alpha(T_s - T_\infty) \quad \text{Ecuación 1-6} \quad [38]$$

α , es el coeficiente de calor de la temperatura, expresado en unidades $\frac{W}{m^2K}$.

Por lo tanto, según la ley de Fourier la ecuación de flujo de calor puede expresarse como:

$$q = \psi(x, y, z, t) = \alpha(T_s - T_\infty) \quad \text{Ecuación 1-7} \quad [38]$$

El calor se transfiere desde la superficie de los cuerpos por convección y radiación. En la transferencia de calor por convección, el calor es transportado por un gas o un líquido, que están en movimiento debido a la diferente densidad de las zonas no calentadas o bajo la acción de fuerzas externas, por ejemplo, soplado de gas de aporte (Figura 1-12).

$$q = \alpha_c(T_s - T_\infty) \quad \text{Ecuación 1-8} \quad [38]$$

De la ecuación anterior α_c es el coeficiente de convección de transferencia de calor, el cual depende de la forma, tamaño y posición del cuerpo, propiedades ambientales, y propiedades del metal base.

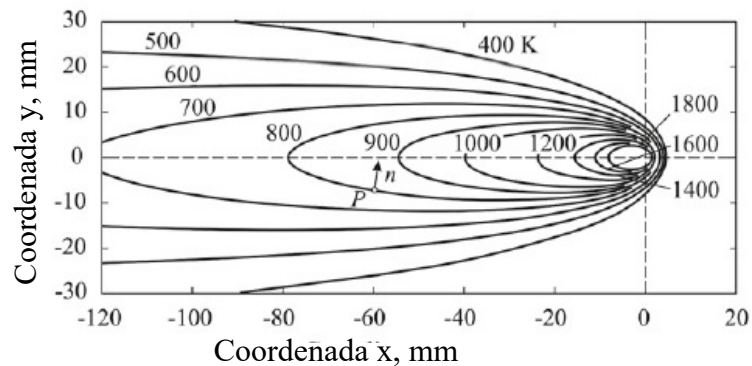


Figura 1-12: Isoterma de la temperatura en una placa infinita de 10 mm [38]

1.9.9.1. Enfriamiento

El enfriamiento del cuerpo mediante la transferencia de calor por radiación se describe mediante la ley de Stefan- Boltzmann, según la cual la densidad del flujo de calor es:

$$q = \varepsilon C_o(T_s^4 - T_\infty^4) = \alpha_r(T_s - T_\infty) \quad \text{Ecuación 1-9} \quad [39],$$

Por lo tanto:

$$\alpha_r = \varepsilon C_o (T_s + T_\infty)(T_s^2 + T_\infty^2) \quad \text{Ecuación 1-10} \quad [39]$$

Donde:

ε : emisividad de la superficie, [0, 1]

C_0 : es la constante de Stefan Boltzmann [$5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$]

La magnitud de ε depende de las condiciones de la superficie, en una superficie de metal pulida el coeficiente puede variar entre 0.2 a 0.4, en superficies oxidadas puede tomar un valor entre 0.6 a 0.95 [39].

La transferencia de calor total se puede representar por la siguiente ecuación:

$$q = \alpha (T_s + T_\infty) \quad \text{Ecuación 1-11} \quad [38]$$

Donde α es igual a la suma del coeficiente de convección y de radiación.

En caso de transferencia de calor natural de la superficie del cuerpo soldado al aire ambiente a la temperatura de la superficie hasta 600 K, la mayor parte del calor se elimina por convección. A una temperatura superior, prevalece la transferencia de calor por radiación, que constituye aproximadamente el 80% de la transferencia total de calor a 1100 K [39]. Los valores recomendados del coeficiente α para calcular los campos de temperatura en las placas durante la soldadura por fusión se presentan en la Tabla 1-2.

Tabla 1-2: Valor de coeficiente de transferencia

Magnitud, características de la eficiencia de la transferencia de calor	Acero con superficie limpia y sin grasa. Superficie no enfriada	Acero superficie limpia. Superficie enfriada	
		Z = 10 mm	Z = 30 mm
Contorno de contacto superficie, % o presión, kPa	50	80-90	80-90
Coefficiente de transferencia de calor α $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$	84-168	1680 – 2100	293 -419

* el valor de z es referente al espesor de la placa

Fuente: [39]

1.9.10. Cálculo de la Temperatura Durante el Proceso de Soldadura

Una característica específica de los problemas de conducción de calor en la soldadura es que, en una zona de alta temperatura, el campo de temperatura se ve afectado sobre todo por las particularidades de la entrada de calor y, en menor medida, por las condiciones de contorno.

El método de la fuente propuesto por Lord Kelvin se prefiere por su capacidad ilustrativa y su simplicidad al considerar las características de las fuentes de calor de la soldadura. Todo esto ha regido su popularidad en el cálculo de los campos de temperatura en estructuras soldadas [39].

El calor de esta fuente se disipa según la ley inherente a la misma, determinada por una ecuación de conducción de calor y unas condiciones de contorno, y no depende de la distribución inicial y de la acción de otras fuentes. Se supone que una fuente puntual instantánea en un sólido homogéneo infinito es una fuente elemental, de la que se compone cualquier fuente distribuida en el espacio y el tiempo. Esta combinación de fuente y sólido representa un principio de interés especial. El siguiente enunciado del problema corresponde a esta combinación:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad \text{Ecuación 1-12} \quad [40]$$

Las condiciones iniciales se definen como T_0 y Q_0 .

Resolviendo la ecuación diferencial se tiene la siguiente ecuación para calcular la temperatura del metal base:

$$T = T_0 + \frac{Q_0}{c_p(4\pi at)^{3/2}} \exp\left(-\frac{R^2}{at}\right) \quad \text{Ecuación 1-13} \quad [40]$$

donde

$R^2 = x^2 + y^2 + z^2$ es equivalente al radio volumétrico.

c_p : calor específico volumétrico

a : difusividad térmica

Si se considera una fuente puntal sobre un sólido, el sólido está compuesto por múltiples placas delgadas de espesor $h=1$, al introducir calor $Q_1 = q/v$ (j/m) en el instante en que la fuente de calor atraviesa la capa. Aceptando la suposición anterior, se obtiene la ecuación a continuación:

$$T = T_0 + \frac{q/v}{2\pi\lambda t} \exp\left(-\frac{r^2}{4at}\right) \quad \text{Ecuación 1-14} \quad [41]$$

Donde:

λ : conductividad térmica

r = distancia del punto de estudio sobre el eje de la fuente = $x^2 + y^2 + z^2$

v = velocidad de soldadura

t = tiempo = $-x/v$

1.9.10.1. Temperatura Pico

Se denomina temperatura pico a la máxima temperatura alcanzada por el sustrato. Es importante para determinar las transformaciones cristalinas. Se puede determinar a partir de una distancia r con respecto al eje de soldadura. Esta dada por la ecuación a continuación:

$$T_{max} = T_0 + \frac{1}{\pi e} \frac{Q/h}{c_p} \frac{1}{r^2} \quad \text{Ecuación 1-15} \quad [41]$$

Donde:

Q : cantidad de calor

h : espesor del metal base

1.9.10.2. Velocidad de Enfriamiento

La velocidad de enfriamiento está descrita en la ecuación 1.16, y es importante para determinar características del ciclo térmico de la soldadura, el cual está relacionado directamente con las microestructuras resultantes.

$$w = 2\pi\lambda \frac{(T-T_0)^2}{q/v} \quad \text{Ecuación 1-16} \quad [41]$$

La fórmula es aplicable a materiales base de acero con un espesor mínimo de 25 mm.

1.9.11. Ciclo Térmico de la Soldadura

El calentamiento de la unión soldada se aplica en casi todas las técnicas de soldadura. El ciclo térmico de un metal viene determinado por las dimensiones de la junta soldada, las condiciones iniciales y de contorno, las propiedades termo físicas del metal, los parámetros de la fuente de calor y la posición del metal respecto a la fuente.

Dado que las fuentes de calor de la soldadura están concentradas (por regla general, sus dimensiones son mucho menores que las del cuerpo soldado), el calentamiento del metal se caracteriza por una importante falta de uniformidad tanto en el tiempo como en el espacio.

En la soldadura por arco del acero, el gradiente de la temperatura máxima cerca de la soldadura puede alcanzar cientos de grados por milímetro. Por lo tanto, los ciclos térmicos del metal de las zonas adyacentes de la junta soldada pueden ser significativamente diferentes.

El ciclo térmico $T(x, y, z, t)$ de un punto arbitrario x, y, z mostrado en la Figura 1-13 es típico para la soldadura de una sola pasada con una distribución de potencia simple en el tiempo y el espacio.

Se caracteriza por los siguientes parámetros principales: temperatura máxima T_{max} , tiempo de permanencia del metal Δt_{T1} por encima de la temperatura preestablecida T_1 , tiempo de retención del metal $\Delta t_{T2/T3}$ en el rango de temperatura $T_2 - T_3$ y velocidad de calentamiento y enfriamiento $\partial T/\partial t$, que es igual a la tangente del ángulo α de la inclinación de la línea tangente a la curva $T(t)$ en el punto t .

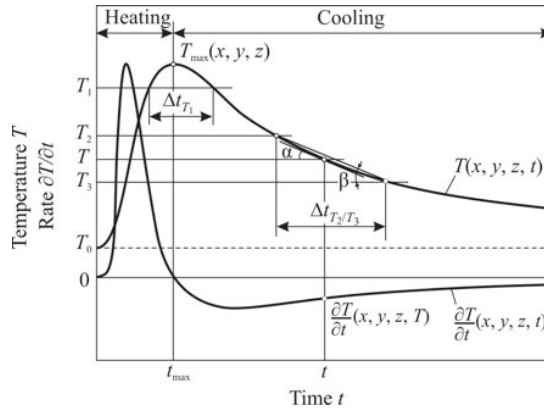


Figura 1-13: Ciclo térmico de la soldadura en función del tiempo [38]

En la Figura 1-14 se observa que la velocidad de enfriamiento w es máxima en el eje del movimiento, es decir cuando $r = 0$. Cuanto más lejos esté el punto estudio r , más alta es la temperatura máxima.

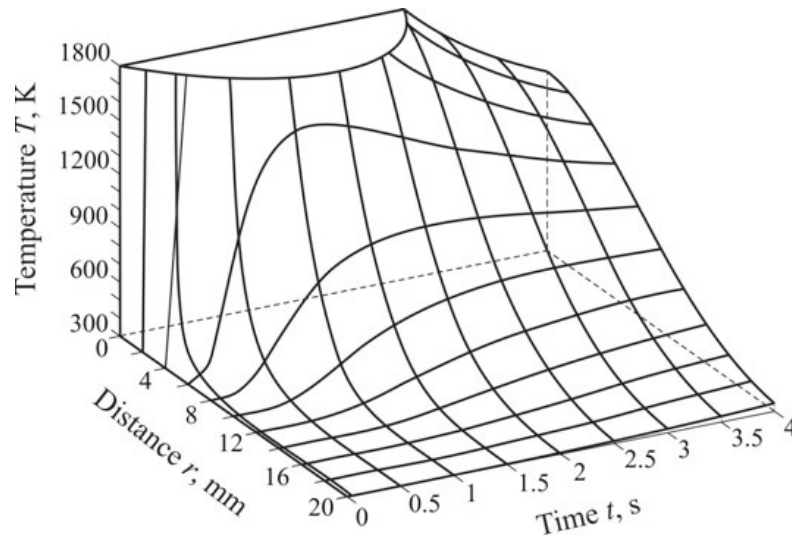


Figura 1-14: Temperatura como función del tiempo y distancia de la velocidad de movimiento [38]

Para predecir la microestructura y las propiedades mecánicas del metal de la ZAT en soldadura del acero, el tiempo de enfriamiento en el rango de temperatura dado desde 800°C (1073 K) a 500°C (773 K) es requerido, mismo que se calcula con la fórmula a posteriori:

$$t_{8/5} = \frac{1}{2\pi\lambda} \eta_H Q/v \left[\frac{1}{773-T_0} - \frac{1}{1073-T_0} \right] \quad \text{Ecuación 1-17} \quad [39]$$

Donde, la temperatura inicial es medida en K y Q_1 está en unidades W, η_h : eficiencia térmica, cuyo valor se obtiene de la Tabla 1-3.

Tabla 1-3: Eficiencia Térmica

Técnica de soldadura	Eficiencia Térmica
Soldadura por arco sumergido	1.0
Soldadura con electrodos rutilicos	0.9
Soldadura con electrodos básicos	0.8
Soldadura con electrodo consumible en Ar o He	0.75
Soldadura con electrodo no consumible en Ar o He	0.65

Fuente: [39]

1.9.12. Formación de Cordón

Si se la temperatura del material base, es posible destacar la región, calentada por encima del punto de fusión T_m , y todas sus características geométricas: longitud L_m , anchura W_m , profundidad H_m y volumen V_m del baño de soldadura y su área transversal A_m (Figura 1-15). La forma de la sección transversal de soldadura se caracteriza por la profundidad relativa de fusión H_m/W_m y el coeficiente de forma $\mu = A_m/(H_m W_m)$.

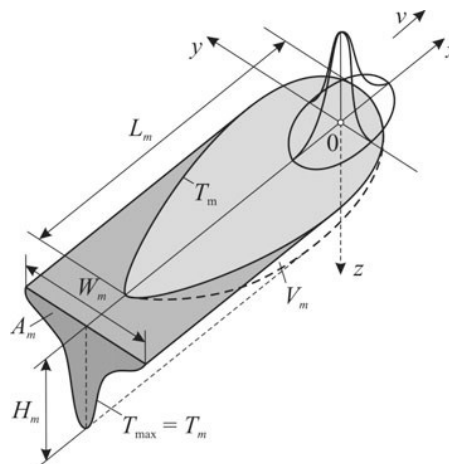


Figura 1-15: Parámetros geométricos del baño de soldadura. [38]

1.9.12.1. Eficiencia del Proceso de Fusión

Teóricamente, sólo el 48.39% de la energía de entrada se gasta en la fusión del metal, el resto se pierde por el vertido del metal líquido y el calentamiento del metal sólido [41].

1.9.12.2. Cálculo de la Sección Transversal

La sección transversal del proceso de soldadura es un rectángulo como se observa en la figura. El área puede ser calculada utilizando la siguiente ecuación:

$$A_m = 2 \frac{1}{\sqrt{2\pi e}} \frac{q/(vh)}{c_p(T_m - T_0)} h \quad \text{Ecuación 1-18} \quad [41]$$

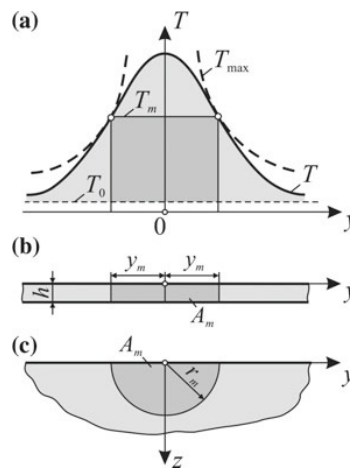


Figura 1-16: Distribución de la temperatura y sección transversal [38]

1.9.12.3. Solidificación del Baño de Soldadura

El movimiento del frente de solidificación determina la velocidad y la dirección de la cristalización y, por consiguiente, la microestructura primaria del metal de soldadura. Por lo general, al analizar el proceso de solidificación se hacen las siguientes suposiciones:

- Los frentes de fusión y solidificación están fijados por la isoterma de liquidus T_L es constante. De hecho, durante la solidificación (a medida que la concentración de impurezas aumenta por delante del frente de solidificación), el valor T_L disminuye y, en consecuencia, la parte de la cola del baño de soldadura se extiende.
- La dirección de la fusión y el crecimiento del cristal coincide con la dirección del gradiente de temperatura G , lo que significa que no se tiene en cuenta la influencia de la orientación cristalográfica y el crecimiento competitivo. Entonces, en la superficie límite dada del baño de soldadura [38].

La microestructura primaria del metal de soldadura está relacionada con la morfología de la solidificación, que viene determinada por el estado del metal líquido sobre enfriado (distribuciones de impurezas y temperatura) por delante del frente de solidificación. Se suelen considerar cuatro casos límite de solidificación de aleaciones, estos casos se describen convenientemente en el plano D_S/R - D_L/R , donde D_S y D_L son los coeficientes de difusión de impurezas en las fases sólida y líquida, respectivamente, como se ilustra en la Figura 1-17. El parámetro D_L/R caracteriza la anchura de la zona de mayor concentración de la impureza por delante del frente de solidificación durante el estado estacionario de esta zona [42].

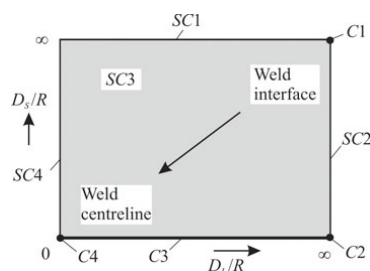


Figura 1-17: Casos límite de solidificación de aleaciones

- Caso 1 (C1). La distribución de la concentración de impurezas en cada fase es de equilibrio debido a la intensa difusión ($D_S \rightarrow \infty$ y $D_L \rightarrow \infty$) y/o al largo tiempo de difusión ($R \rightarrow 0$). Esto corresponde a los diagramas de fase.
- Caso 2 (C2). No hay difusión de la impureza en la fase sólida ($D_S = 0$). La distribución de las impurezas en la fase líquida es uniforme debido a la mezcla

mecánica ideal y a la difusión intensiva ($D_L \rightarrow \infty$). Este es el conocido modelo de cálculo de Gulliver-Scheil.

- Caso 3 (C3). No hay difusión de la impureza en la fase sólida ($D_S = 0$). La difusión se produce sólo en el líquido ($0 < D_L < \infty$).
- Caso 4 (C4). La concentración de la impureza en el líquido no cambia con el tiempo debido a la ausencia de mezcla mecánica y difusión ($D_L = 0$) [42].

Para la predicción cuantitativa, es necesario conocer el campo de concentración de la impureza en el frente de solidificación, que puede obtenerse resolviendo el problema de difusión para el cuerpo no homogéneo, teniendo en cuenta la diferente solubilidad de la impureza en las fases. La trayectoria del crecimiento de los cristales viene determinada por la forma de la superficie límite del baño de soldadura. Con este enfoque, se aceptan los siguientes supuestos físicos se aceptan las siguientes suposiciones físicas

- El frente de solidificación está fijado por la isoterma de liquidus T_L .
- La distribución del tamaño y la orientación cristalográfica de los granos son conocidas.
- El problema de solidificación es bidimensional, lo que es cierto para el caso de la soldadura de placas finas.
- Existe una selección de granos según el siguiente criterio: la tasa de crecimiento de crecimiento del grano cuya dirección cristalográfica está más cerca de la dirección del gradiente de temperatura es mayor que la del grano vecino.

Las condiciones de soldadura tienen un efecto significativo sobre la forma y la textura del metal de soldadura. La forma del baño de soldadura determina la orientación cristalográfica preferente de los granos (el ángulo γ más probable de la orientación cristalográfica de los granos). Cuanto más alargada es la forma del baño (mayor es la velocidad v), mayor es el ángulo γ . Cuanto más ancho es el baño de soldadura en relación con el tamaño de los granos del metal base, más intensa es la selección de los granos, lo que da lugar a la diferencia en la textura y, por tanto, en las propiedades entre el metal de soldadura y el metal base. La diferencia aumenta con la distancia de la interfaz de soldadura [38].

1.9.13. Predicción de la Dureza

El comportamiento de una junta soldada en condiciones externas (carga, temperatura, entorno hostil, etc.) depende de la microestructura local y de las propiedades mecánicas locales de todas las zonas de la junta soldada. Para predecir la microestructura y las propiedades, es necesario conocer los procesos térmicos en la junta soldada, es decir, resolver el problema de conducción de calor teniendo en cuenta la geometría del cuerpo, las condiciones de contorno, las condiciones de soldadura y las propiedades termo físicas del metal. Además, se supone que se conocen los ciclos térmicos de todas las zonas de la junta soldada.

Las diferentes zonas de la unión soldada están sometidas a un ciclo térmico diferente durante la soldadura. El metal en la zona de soldadura se calienta más rápido y a mayor temperatura que el metal situado a distancia de la soldadura. Como resultado, las zonas tienen diferentes propiedades metalúrgicas y mecánicas locales.

Las zonas de fusión parcial y los granos gruesos son críticos en una unión soldada de aceros de baja aleación. El ciclo térmico va acompañado de fenómenos físicos y químicos que determinan la resistencia del metal durante y después de la soldadura, como la susceptibilidad al agrietamiento en frío y en caliente, la dureza, la resistencia y la tenacidad. Una descripción suficientemente precisa de la historia térmica de cada ZAT y punto de soldadura es el requisito básico para la modelización de las reacciones metalúrgicas.

Los aceros de baja aleación son sensibles al ciclo térmico de la soldadura. En la soldadura de varias pasadas el metal de la ZAT se recalienta, lo que determina su microestructura final y, en consecuencia, las propiedades mecánicas.

En la soldadura de aceros martensíticos de baja aleación se forma una zona de grano grueso cerca de la interfaz de soldadura ($T_{\max 1} = 1623 \text{ K}$). Durante el enfriamiento, la austenita se descompone en martensita (si el tiempo de enfriamiento $< 9 \text{ s}$), bainita y martensita (si $9 \text{ s} < t < 50 \text{ s}$), bainita (si $50 \text{ s} < t < 400 \text{ s}$) o bainita con ferrita (si $t > 400 \text{ s}$). En este caso, la dureza HV 10 de esta zona depende en gran medida del tiempo de

enfriamiento. Si la microestructura final es totalmente martensítica, la dureza es constante [43].

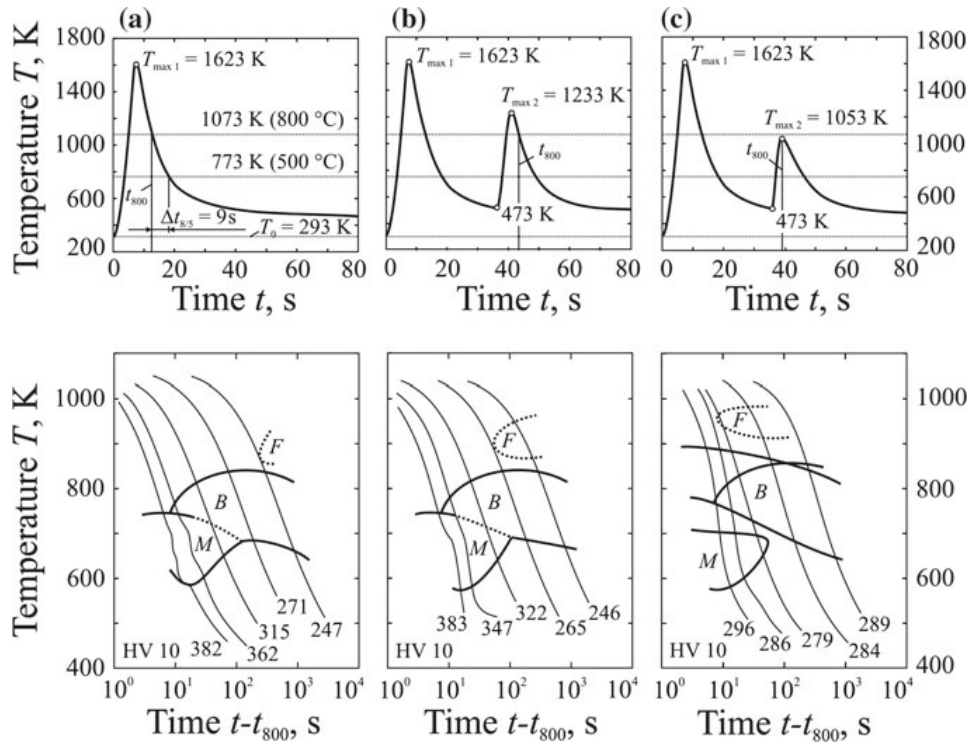


Figura 1-18: Ciclos térmicos y diagramas de transformación en enfriamiento continuo de un acero de baja aleación de alta resistencia en una zona afectada por el calor de grano grueso durante la primera pasada (a) y segunda pasada (b, c) de soldadura [43]

Durante la segunda pasada, el metal de la zona de grano grueso puede calentarse y convertirse en austenita completamente, si la temperatura máxima $T_{\max 2}$ es superior a la temperatura característica A_{C3} , $T_{\max 2} = 1233 \text{ K} > A_{C3}$ o parcialmente $A_{C1} < T_{\max 2} < 1053 \text{ K} < A_{C3}$). En el primer caso, los productos de descomposición de la austenita incluirán martensita, bainita y ferrita con la misma dureza que antes de la primera pasada. En este último caso, la microestructura sólo se convierte parcialmente (hasta un 70%) en austenita durante el recalentamiento a $T_{\max 2} = 1053 \text{ K}$. Por lo tanto, el diagrama TTT es cierto sólo para la descomposición de esta austenita. Se forma una microestructura de martensita-bainita incluso bajo un enfriamiento extremadamente rápido. La temperatura de inicio de la martensita es ligeramente inferior a la de la primera pasada. La dependencia de la dureza HV10 de la velocidad de enfriamiento es muy débil [43].

La cinética de la microestructura del metal de la ZAT se vuelve más compleja si el número de pasadas es superior a dos, como en la soldadura a tope en V gruesa. En este caso, la soldadura de cada cordón posterior provoca un efecto térmico adicional tanto en el metal de las pasadas anteriores como en el metal de la ZAT. En consecuencia, el metal cambia su microestructura, es decir, su microestructura se vuelve más equilibrada. El grado de cambio de microestructura viene determinado por el ciclo térmico del metal (temperatura máxima, velocidad de enfriamiento, etc.), que puede calcularse o medirse.

En la práctica, la ZAT en la soldadura multipaso de los aceros tiene una estructura compleja no homogénea. Los límites de las zonas ZAT de dos pases adyacentes están determinados por las temperaturas máximas. En una ZAT, existen las áreas 1-4, mostradas en la Figura 1-19, que no se ven afectadas por los cordones posteriores, y las áreas 5-20, cuya estructura cambia bajo la influencia térmica de los cordones posteriores. En las zonas 1, 5-8 y 20, el metal es de grano grueso y frágil, y el factor dominante es la temperatura máxima en torno a 1600 K. En las zonas 2, 9-11 y 19, el metal es de grano fino y muy resistente. En las zonas 3, 13-16, hay riesgo de fragilidad intercrítica. La zona 16 se ve especialmente afectada, siendo inicialmente de grano grueso y convirtiéndose después parcialmente en austenita. Esto puede conducir a la disolución de partículas sensibles. El enfriamiento rápido de la austenita enriquecida en carbono conduce a la formación de martensita [44].

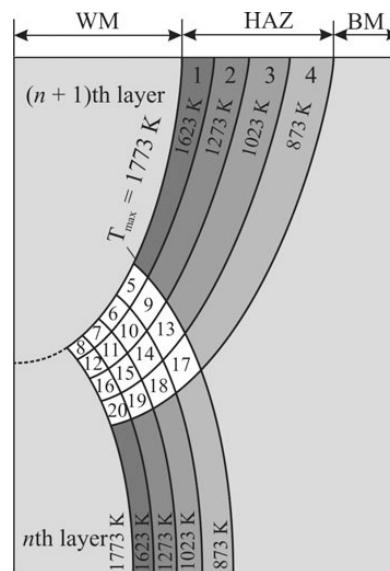


Figura 1-19: Zonas afectadas por el calor en la soldadura multipases [44].

De este modo, la ZAT y el metal de soldadura de las pasadas anteriores se someten a un tratamiento térmico durante la soldadura multipaso. Teniendo en cuenta la composición química de los materiales base y de soldadura, es teóricamente posible encontrar tales ciclos térmicos (optimizar las condiciones de soldadura) que conduzcan a las microestructuras y propiedades mecánicas requeridas de la unión soldada. La soldadura superficial helicoidal de sólidos cilíndricos (con rotación simultánea del cilindro y movimiento de la fuente a lo largo de la generatriz) permite obtener ciclos térmicos óptimos similares a los de las islas de soldadura multipaso.

Los ciclos térmicos del metal durante la soldadura y el tratamiento térmico normal son muy diferentes en cuanto a la duración, la temperatura máxima y la temperatura de austenización.

Las velocidades de enfriamiento del metal pueden ser diferentes en órdenes de magnitud, por lo que la microestructura y las propiedades mecánicas del metal pueden ser sustancialmente diferentes. Por lo tanto, para poder predecir la microestructura durante la soldadura, es necesario utilizar diagramas anisotérmicos de transformación tiempo-temperatura.

En la Figura 1-20 se muestran las curvas típicas de composición de la ZAT en la soldadura de aceros de baja aleación. En condiciones de enfriamiento rápido del metal ($t < 1$ s), el efecto de la difusión del carbono es débil, y la transformación de la austenita se produce en forma de martensita.

El papel de la difusión crece con la disminución de la velocidad de enfriamiento, se produce la transformación de bainita y se producen ferrita y perlita. A $t < 60$ s, la fase martensita está prácticamente extinguida, mientras que a $t < 200$ s la transformación de austenita se produce completamente en forma ferrítico-perlítica. Por lo tanto, es posible calcular el ciclo térmico y determinar la microestructura de la ZAT tras la soldadura de un solo paso a partir de la geometría de la unión soldada, las propiedades del metal y las condiciones de soldadura.

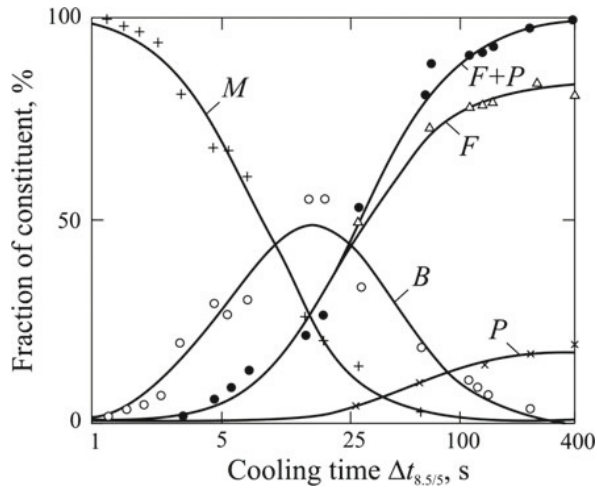


Figura 1-20: Microestructura constituyentes del metal ZAT después de la soldadura de baja aleación [38]

El diagrama de descomposición de la austenita depende de la temperatura máxima. La estabilidad de la austenita aumenta a medida que aumenta la temperatura. La evaluación precisa del comportamiento del metal para las diferentes zonas de la ZAT requiere un diagrama con diferentes picos de temperatura de austenitización. Estos pueden resumirse en forma de diagramas PTCT (diagrama de temperatura pico frente a tiempo de enfriamiento) como se observa en la Figura 1-21. El diagrama indica el tipo de microestructura resultante de diferentes combinaciones de temperatura de pico de austenización $T_{a\max}$ y tiempo de enfriamiento t . En el tiempo especificado es posible encontrar la microestructura, la dureza y el tamaño de grano en función de la temperatura $T_{a\max}$. En las líneas discontinuas se muestran las líneas con dureza similar HV 30.

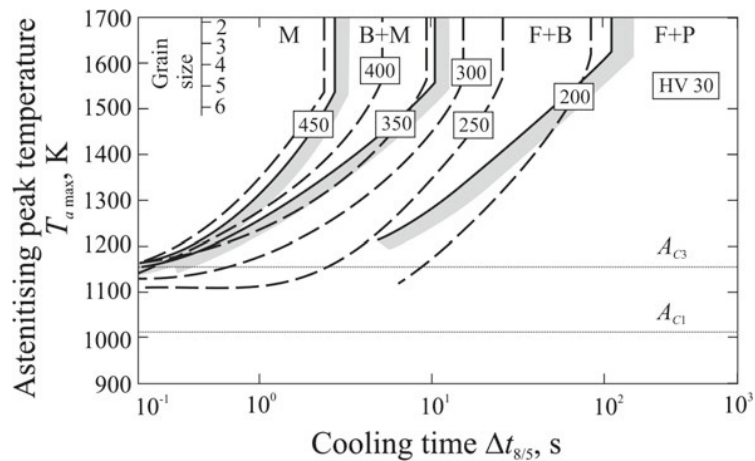


Figura 1-21: Diagrama de Temperatura Pico Frente a Tiempo De Enfriamiento. [43]

La composición de fase del metal de la ZAT en el acero de soldadura depende del ciclo térmico. En la actualidad es difícil construir modelos de cálculo basados en los mecanismos físicos examinados de las transformaciones en el acero. Por lo tanto, los modelos de regresión de la formación de las fases, teniendo en cuenta la velocidad de enfriamiento, pueden utilizarse con fines prácticos. Basándose en el análisis de los diagramas CCT conocidos para los aceros de baja aleación, se propusieron modelos para evaluar la proporción de martensita M, ferrita y perlita F + P y bainita B en la estructura de la ZAT.

Con el conocimiento del historial térmico en toda la soldadura y la ZAT, se puede predecir la dureza posterior a la soldadura en cualquier parte de la zona de soldadura. Sin embargo, para ello, primero hay que dividir la soldadura en dos secciones: las zonas supercríticas de la soldadura y las zonas subcríticas de la misma. Estas regiones deben estar separadas, ya que la dureza en la zona supercrítica está impulsada por la transformación de fase, mientras que el mecanismo que controla la dureza final de la zona subcrítica es el revenido

La dureza post - soldadura de la ZAT supercrítica es una función de las fases que se forman cuando la soldadura se enfría. La predicción de las fases que se forman en la ZAT de las soldaduras por arco metálico con gas fue estudiada por Yurioka quienes relacionaron la dureza de una estructura totalmente martensítica y la dureza de una estructura totalmente bainítica con la química del material. A continuación, el estudio predijo cómo interactuaban las dos fases para desarrollar la dureza de una estructura mixta que incluyera ambas fases. Para predecir la estructura que se forma al enfriarse, compararon el tiempo de enfriamiento del material de 800 °C a 500 °C ($t_{8/5}$) con el tiempo máximo de $t_{8/5}$ que daría lugar a una estructura totalmente martensítica y el tiempo mínimo de $t_{8/5}$ que formaría una estructura que no contiene martensita y ambos pudieron relacionarlos también con la química del material. A continuación, se indican todas las relaciones necesarias para predecir la dureza de la microestructura enfriada[45]:

$$HV_{max} = 44.2 * C + 99CE_{II} + 206 + (402 * C - 90 * CE_{II} + 80) * \arctan (x)$$

Ecuación 1-19 [46]

Donde x es función del carbono equivalente durante el tiempo de enfriado

$$x = \frac{\log\left(\frac{t_8}{5}\right) - 2.3CE_I - 1.35CE_{III} + 0.882}{1.15CE_I - 0.673CE_{III} - 0.601}$$

Ecuación 1-20 [46]

$$CE_I = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{12} + \frac{Cr}{8} + \frac{Mo}{4}$$

Ecuación 1-21 [46]

$$CE_{II} = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{5} + \frac{Cu}{10} + \frac{Ni}{18} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{2.5} + \frac{V}{5} + \frac{Cb}{3}$$

Ecuación 1-22 [46]

$$CE_{III} = C + \frac{Mn}{3.6} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{9} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4}$$

Ecuación 1-23 [46]

1.9.13.1. Soldadura de Pases de Revenido (Temper Bead)

El procedimiento de soldadura de pases de revenido es una de las técnicas de soldadura de reparación más importantes para los recipientes a presión ferríticos de reparación para recipientes de presión ferríticos para los que es difícil realizar el tratamiento térmico posterior a la soldadura especificado.

La reparación de soldaduras mediante la técnica pases de revenido es una opción atractiva para la reparación en servicio de algunos grados de aceros ferríticos comunes y populares para recipientes a presión. La ejecución de esta técnica en el campo debe ser precisa y muy sistemática. Esta técnica se desarrolló originalmente para las empresas nucleares y fue adoptada por los códigos de diseño nuclear de ASME (Sección III) y el código de inspección en servicio Sección XI, y posteriormente fue adoptada por otros códigos de reparación de soldaduras. Debido a las diferentes exigencias de diseño y a las consideraciones de aceptación, en los últimos 30 años se han desarrollado múltiples variaciones de técnicas de reparación de cordones de templado. La Figura 1-22 muestra cómo se realizan los pases de soldadura en el proceso Temper Bead.

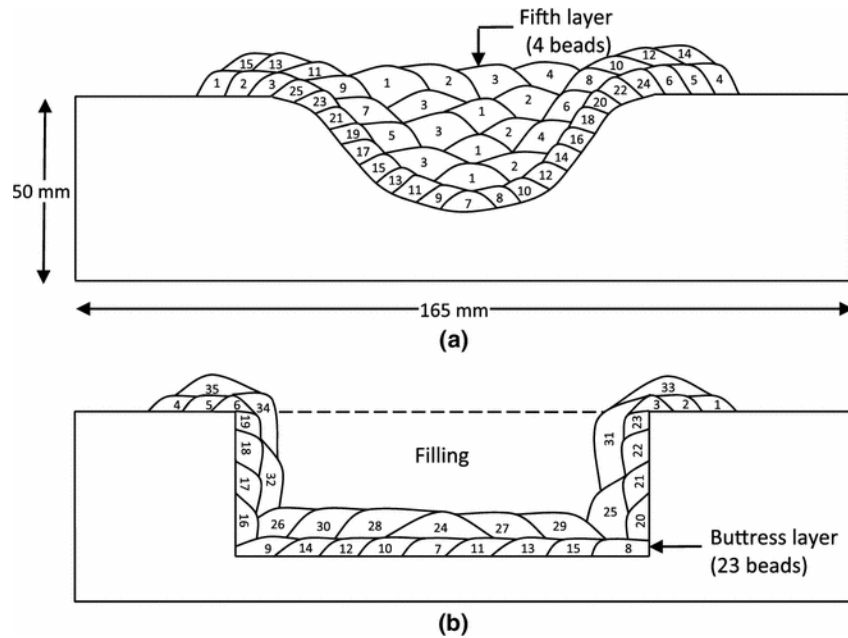


Figura 1-22: Pases Temper Bead [5]

1.9.14. Modelado Numérico

La naturaleza compleja del proceso de soldadura provoca la dificultad de analizar y modelar mediante métodos numéricos. Estas complejidades incluyen: propiedades materiales y térmicas que varían con temperatura, transferencia de calor transitoria con condiciones de contorno complicadas, fuentes de calor en movimiento cambios y transformaciones de fase, estados de tensión residual complejos y las dificultades para realizar mediciones experimentales a altas temperaturas. Además de estas complejidades, la modelización por elementos, el modelado por elementos finitos del proceso de soldadura debe incluir complejas interacciones termomecánicas, transformaciones metalúrgicas, depósito de material y fuentes de calor en movimiento. La predicción precisa del ciclo térmico en la unión soldada es el primer paso para predecir las tensiones residuales. La predicción del campo de temperatura requiere un análisis no lineal y tridimensional con propiedades de material dependientes de la temperatura. Las fuentes de calor en movimiento se utilizan para generar los campos de temperatura durante el proceso de soldadura y el depósito de material se implementa utilizando una variedad de medios. El historial de temperaturas se utiliza para el

cálculo de las tensiones térmicas y los campos de desplazamiento durante y después del proceso de soldadura . En otras palabras, una vez conocido el historial térmico, se debe calcular la deformación plástica debida a la expansión y contracción térmica . En la figura 1.8 se muestra una muestra de la distribución de tensiones residuales predicha por una simulación de soldadura.

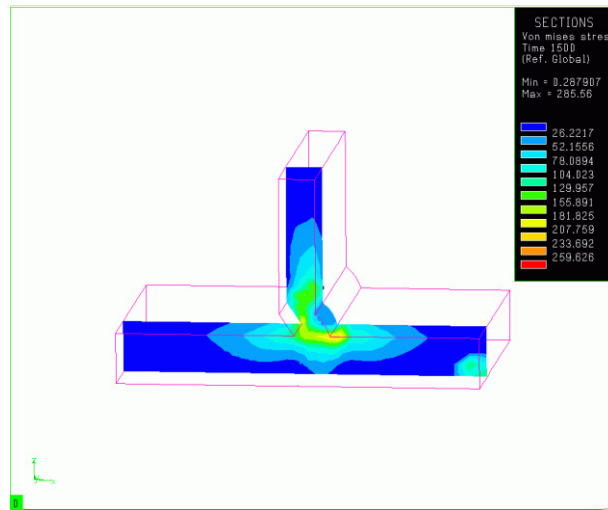


Figura 1-23: Distribución de esfuerzo Residual en una Junta en T de Aluminio [25]

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA.

2.1. Recursos Materiales

2.1.1. Materiales

2.1.1.1. Probetas de Acero ASTM A 743 grado CA -6 NM.

Según la norma ASTM el acero es una aleación de bajo carbono de estructura cristalina martensítica, en la cual la letra C revela que es resistente a la corrosión a temperaturas inferiores a 650°C, la letra A refiere a la relación de los aleantes cromo y níquel, el número 6 indica el porcentaje de carbono (al dividirlo para 100).

Tabla 2-1: Composición química nominal del acero ASTM A 743 CA6-NM

Composición wt%							
Carbono máx.	Manganeso máx.	Silicio máx.	Fósforo máx.	Azufre máx.	Cromo	Níquel	Molibdeno
0.06	1	1	0.04	0.03	11.5 – 14.00	3.5 – 4.5	0.4 - 1

Fuente: [22]

Tabla 2-2: Propiedades mecánicas de la aleación CA6-NM según ASTM A743.

Resistencia a la tensión, mínima		Resistencia a la fluencia, mínima		Elongación 2 pulg. (50 mm) mínimo %	Reducción de área, mínimo %
(ksi)	(MPa)	(ksi)	(MPa)		
110	775	80	550	15	35

Fuente: [22]



Figura 2-1: Placas Soldadas, Probetas 1, 2, 3, y 4

Fuente: Autor

2.1.1.2. Electrodo ER-410 Ni-Mo

El electrodo ER-410 Ni-Mo está fabricado para procesos de soldadura en los que el material base posea características similares referentes a su composición química. Entre las recomendaciones del fabricante se tiene que la temperatura de precalentamiento no sea menor a 150°C y que la temperatura de tratamiento térmico no exceda los 620°C.

Tabla 2-3: Composición química del metal de aporte martensítico

Composición wt%								
C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Cu
0.06	11.0-12.5	4.05-5.0	0.4-0.7	0.6	0.5	0.3	0.3	0.75

Fuente:[21]

2.1.2. Equipos

2.1.2.1. Soldadora eléctrica para proceso GTAW

La soldadura por arco de gas-tungsteno (GTAW) es un proceso que funde y une metales calentándolos con un arco establecido entre un electrodo de tungsteno no consumible y los metales. La antorcha que sostiene el electrodo de tungsteno está conectada a un cilindro de gas de protección, así como a un terminal de la fuente de energía. El electrodo de tungsteno suele estar en contacto con un tubo de cobre refrigerado por agua, llamado tubo de contacto. Esto permite que tanto la corriente de soldadura de la fuente de energía entre en el electrodo como que éste se enfríe para

evitar el sobrecalentamiento. La pieza de trabajo está conectada al otro terminal de la fuente de energía a través de un cable diferente. El gas de protección pasa por el cuerpo de la antorcha y es dirigido por una boquilla hacia el baño de soldadura para protegerlo del aire. La protección contra el aire es mucho mejor en GTAW que en SMAW porque normalmente se utiliza un gas inerte como el argón o el helio como gas de protección y porque el gas de protección se dirige hacia el baño de soldadura. Por esta razón también se denomina soldadura con gas inerte de tungsteno (TIG).



Figura 2-2: Soldadura GTAW

Fuente: Autor

2.1.2.2. Durómetro

El Equipo de Proceq permite la inspección portátil de la dureza de casi cualquier objeto, piezas pulidas y superficies tratadas térmicamente. Las mediciones de dureza se realizan mediante el método de ensayo de rebote dinámico según Leeb, el ensayo de dureza Rockwell portátil estático y el método de impedancia de contacto ultrasónico (UCI). Los robustos durómetros para ensayos no destructivos de metales, de fabricación suiza, están diseñados para realizar ensayos de dureza portátiles en el laboratorio, en el taller, en las instalaciones de producción o in situ.



Figura 2-3: Durómetro

Fuente: Autor

2.1.2.3. Microscopio Óptico

El microscopio óptico, a menudo denominado "microscopio óptico de luz", es un tipo de microscopio que utiliza la luz visible y un sistema de lentes para ampliar las imágenes de pequeñas muestras. Los microscopios ópticos son el diseño más antiguo de los microscopios y posiblemente fueron diseñados en su forma compuesta actual en el siglo XVII. Los microscopios ópticos básicos pueden ser muy sencillos, aunque hay muchos diseños complejos que pretenden mejorar la resolución y el contraste de las muestras. Históricamente, los microscopios ópticos eran fáciles de desarrollar y son populares porque utilizan luz visible, por lo que las muestras pueden ser observadas directamente por el ojo.

Recursos Digitales

- Ansys Research
- Clemex
- Microsoft Office

2.2. Metodología

La presente investigación tendrá un enfoque cuantitativo, además se emplearán métodos teóricos y empíricos como se observa en el diagrama de flujo, adicional a ello se empleará una metodología teórica y práctica que conllevarán al analizar la dureza del acero después de la soldadura, de esta forma se estipula el mejor proceso que proporcione el menor incremento de dureza, y la mejor estructura cristalina. Los estudios se desarrollarán en el Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas Hidráulicas y Partes Industriales CIRT que es parte de CELEC EP.

2.2.1. Nivel o Tipo De Investigación

Histórico, lógico: Histórico debido a que se conocerán la evolución y avances de la soldadura de revenido. Lógico: reproduce los aspectos más importantes de las investigaciones consultadas

Inductivo, deductivo: Inducción, se estudiarán las investigaciones realizadas en el contexto macro y micros para establecer los hallazgos, además de las investigaciones en la modelación y obtención de condiciones de frontera. Deductivo: con las conclusiones generales se aportará para el desarrollo de esta investigación particular, adicional a ello con los resultados del modelo, se llegará a la conclusión del mejor proceso

Análisis y Síntesis: Análisis: Descomposición del tema en sus partes que facilite la comprensión de variables, descomposición de las etapas del procedimiento para el control de las variables en el procedimiento, descomposición del tema en sus partes que facilite la comprensión de variables, se descompondrán los estudios experimentales y los resultados del modelado. Síntesis: Se establece como se relacionan las variables entre sí, se elabora la síntesis al elaborar un procedimiento general para la el proceso de manufactura en la reparación del rodete, se establece como se relacionan las variables entre sí, para comprender el proceso de soldadura, se unirán las partes analizadas y se descubrirán las características esenciales para llegar a las conclusiones y propuesta

Experimentación: Se estudiará el proceso de revenido, en el cual se establecerán las condiciones adecuadas para conocer el comportamiento del objeto, para la comprobación de la hipótesis.

Observación Científica: Permitiendo conocer la realidad del proceso de soldadura de revenido

Medición: Se tomarán datos numéricos para posteriormente realizar la comprobación de la hipótesis

Modelación: Se creará un modelo numérico abstracto para explicar la realidad del proceso de soldadura

Método numérico: Se realizarán un procedimiento, para obtener de manera virtual, soluciones al proceso de soldadura.

2.3. Operacionalización de variables

Variable Independiente.

Proceso de soldadura de pases de revenido

Tabla 2-4: Operacionalización Variable Independiente

CONCEPTO	CATEGORÍAS	INDICADORES	ÍNDICE	TÉCNICAS INSTRUMENTOS	E
La soldadura es un proceso en el cual se realiza la unión de dos materiales, con o sin la fusión de un material de aporte con o sin la presencia de una presión externa	Parámetros del Proceso de Soldadura	Velocidad de Avance	150 – 2005 mm/min	Observación directa. Bibliográfica. Método experimental Ensayos preliminares. Panel de control.	
		Intensidad de corriente en el primer pase	160 A	Observación directa. Bibliográfica. Método experimental Ensayos preliminares. Panel de control.	
		Intensidad de corriente pases subsecuentes	150 – 200 A	Observación directa. Bibliográfica. Método experimental Ensayos preliminares. Panel de control.	

Fuente: Autor

Variable Dependiente

Características de la zona térmicamente afectada.

Tabla 2-5: Operacionalización Variable Dependiente

CONCEPTO	CATEGORÍAS	INDICADORES	ÍNDICE	TÉCNICAS INSTRUMENTOS	E
La zona térmicamente afectada es una porción del material que se encuentra entre la zona de fusión por el proceso de soldadura y el límite del sustrato o material base	Propiedades Mecánicas	Dureza	285 HBW	Ensayo de laboratorio. Norma ASTM A743 Norma ASTM A370 Durómetro Observación directa. Bibliográfica	
	Distribución de Calor	Flujo de Calor	0.0315 – 0.75 KJ/mol[35]	Ensayo de laboratorio. Ecuaciones de cálculo Norma ASTM A743 Termómetro infrarrojo Observación directa. Bibliográfica	
		Temperatura	1400 – 1750 K[35]		
	Metalurgia de la soldadura	Estructura cristalina	Martensita revenida	Ensayo de laboratorio. Norma ASTM A743 Microscopio electrónico Observación directa. Bibliográfica	

Fuente: Autor

2.4. POBLACIÓN Y MUESTRA

2.4.1. Población

En el sector de generación eléctrica el material base utilizado ampliamente en las manufacturas de componentes de la turbina hidráulica es el acero inoxidable ASTM A 743 grado CA -6 NM. En la presente investigación la población investigativa será el acero inoxidable utilizado en los rodets de turbina Pelton, enfocado en el proceso de

soldadura de recuperación. Para ello se utilizarán muestras de material base y se realizarán pruebas de soldadura para estudiar el efecto en las propiedades mecánicas.

2.4.2. Muestra

Se realizará un muestreo no probabilístico debido a que se seleccionarán las muestras basadas en el criterio de un modelo experimental factorial, en el cual se establecen los parámetros variacionales.

Se estudiarán los efectos de la soldadura en la zona térmicamente afectada y la distribución de calor, para lo cual se variarán parámetros del proceso como amperaje y número de pasos. Una vez a ello se realizarán ensayos no destructivos en el material base, para evaluar la dureza y visualizar la microestructura resultante.

Mediante el diseño experimental factorial se garantiza una distribución ortogonal de los factores y un nivel de confiabilidad del 95%, en el cual se obtienen las siguientes combinaciones:

$$n = m * (VA. * IPP * IPS) = 3 * (2 * 1 * 2) = 3 * 4 = 12$$

Donde VA es la velocidad de avance

IPP es la intensidad de corriente en el primer pase

IPS intensidad de corriente en pases subsecuentes

En la tabla 2-6, se muestran las combinaciones posibles del presente estudio.

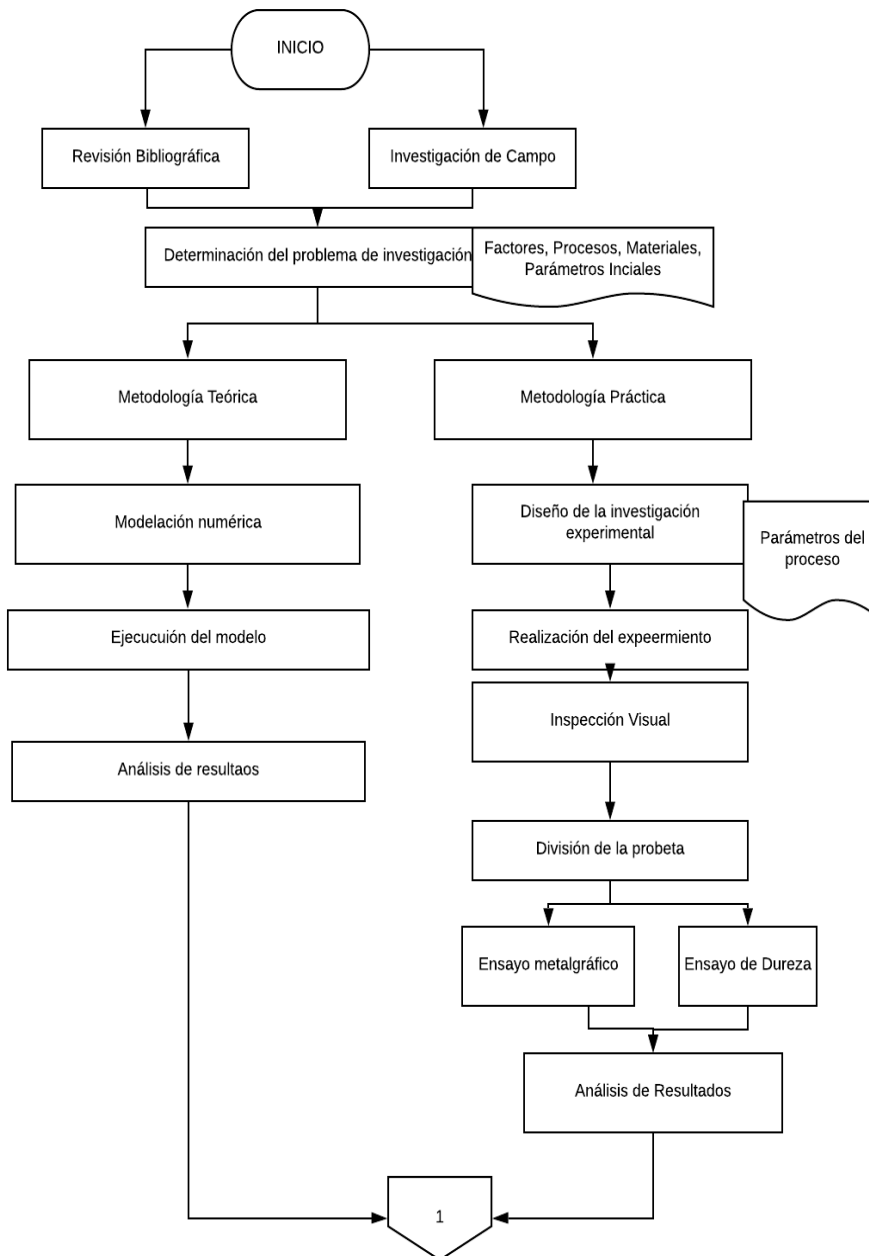
Tabla 2-6. Factores de experimentación

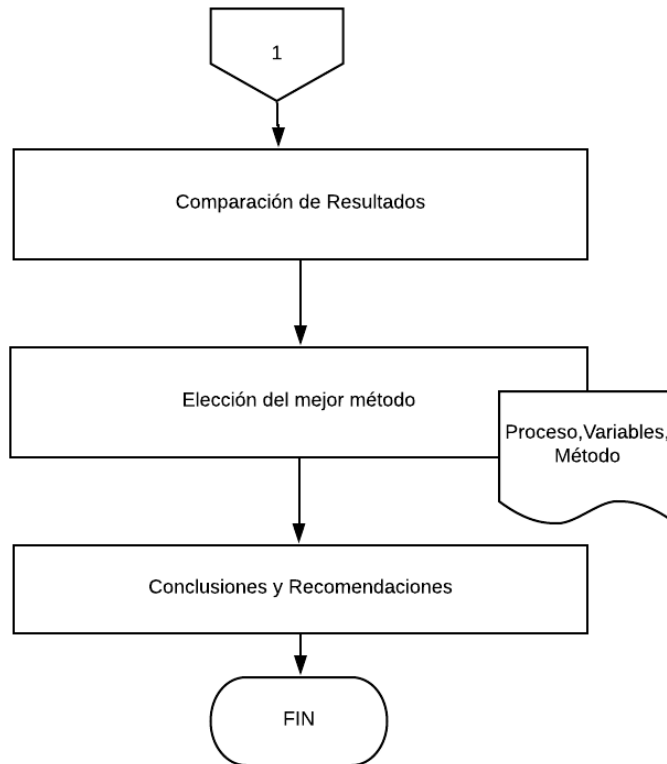
Material Base	Proceso de Soldadura	Velocidad de Avance (mm/min)	Amperaje (A)	
			Primer Pase	Pases Subsecuentes
Acero Inoxidable ASTM A 743 grado CA - 6 NM	GTAW	150	160	160
				200
		200	160	160
				200

Fuente: Autor

2.5. Proceso

En el siguiente diagrama de flujo se observa la metodología a desarrollarse en el presente estudio de investigación, en el cual se encuentran los pasos secuenciales para el cumplimiento de los objetivos.





2.6. Recolección de la Información

La recolección de la información es concordante con la operacionalización de variables, por lo cual se realizarán experimentos para toma de datos variando los parámetros del proceso de soldadura de recuperación en acero inoxidable martensita ASTM A743 grado CA6-NM, de las cuales se obtendrán datos referentes a la temperatura obtenida en el proceso, para comparar con los resultados obtenidos en el modelo numérico, referente a la distribución de calor, además se obtendrán resultados de las propiedades mecánicas después del proceso de soldadura, para analizar y alcanzar mejores características mecánicas.

El registro se hará un diario de campo y fichas técnicas, además de bitácoras en las cuales se registrará sucesos importantes observados, así como los resultados de las

pruebas de laboratorio; igualmente para comparar con los registros obtenidos de la búsqueda bibliográfica.

2.7. Procesamiento de la información

2.7.1. Plan de procesamiento

Para el procesamiento de la información se planeó los siguientes pasos enlistados a continuación:

1. Recolección de información sobre el parámetro y proceso de soldadura de recuperación para un acero inoxidable ASTM A743 grado CA6-NM.
2. Realización de un modelo numéricos para la obtención de la distribución de calor, mediante el Método de Elementos Finitos.
3. Realización del proceso experimental:
 - a. Selección de los parámetros para cada experimento.
 - b. Preparación de las probetas.
 - c. Realización de la soldadura según WPS.
 - i. Recolección de la temperatura inicial y temperatura final.
 - ii. Control de la velocidad de pases.
 - d. Limpieza de impurezas y escoria.
 - e. Inspección visual del cordón para detección de imperfecciones y defectos.
 - f. Realización del ensayo de dureza
 - g. Elaboración del ensayo metalográfico.
4. Tabulación de resultados
5. Comparación de los resultados experimentales con el modelo numérico.
6. Determinación de los parámetros que proporcionen mejores propiedades mecánicas acordes con el trabajo realizado por el material base.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis y Discusión de los Resultados

3.1.1. Recopilación de datos preliminares

3.1.1.1. Características del Material Base y Material de Aporte

Mediante un diseño experimental se caracterizarán las propiedades mecánicas del acero inoxidable ASTM 743 grado CA6-NN, para establecer las diferencias entre estas y las propiedades obtenidas sin variación de los parámetros. Adicional a ellos se compararán los resultados con el modelo numérico, que servirá de base para futuras reparaciones en campo.

El material base, en el cual se va a estudiar los efectos de la soldadura de revenido, haciendo hincapié en la metalurgia de la soldadura, utilizando un proceso de soldadura GTAW, con material de aporte electrodo ER 410 NiMo.

Para ello se ha planteado la preparación de 12 probetas, cuyas dimensiones se muestran en la figura a continuación:

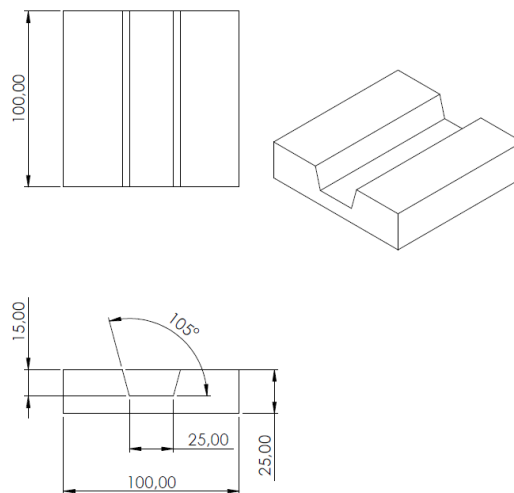


Figura 3-1: Probetas para el Diseño Experimental

Las probetas se obtendrán de bloques de acero martensítico, los cuales se someterán a corte y posteriormente a maquinado para la obtención de la ranura.

Con los datos de la composición química del material base se calcula el Cromo Equivalente del material base y material de aporte, y la aplicación del Diagrama de Constitución de Schaeffler se obtiene la estructura resultante en el cordón de soldadura.

Material Base:

Tabla 3-1: Composición química del material base

Carbono	Magnesio	Silicio	Fósforo	Azufre	Cromo	Níquel	Molibdeno
0.044	0.6	0.587	0.04	<0.0035	12.02	3.805	0.507

$$\text{Cr equivalente} = \% \text{ Cr} + \% \text{ Mo} + 1.5 \% \text{ Si} + 0.5 \% \text{ Nb} \quad [47]$$

$$\text{Cr equivalente} = 12.02 + 0.507 + 1.5(0.578) + 0.5(0.01)$$

$$\text{Cr equivalente} = 13.41$$

$$\text{Ni equivalente} = \% \text{ Ni} + 30 \% \text{ C} + 30\% \text{ N} + 0.5 \% \text{ Mn} \quad [47]$$

$$\text{Ni equivalente} = 3.805 + 30(0.044) + 0.5(0.6)$$

$$\text{Ni equivalente} = 5.425$$

Material de Aporte:

Tabla 3-2: Composición química del material base

Carbono	Magnesio	Silicio	Fósforo	Azufre	Cromo	Níquel	Molibdeno	Cobre
0.02	0.7	0.45	< 0.02	< 0.01	12.3	4.2	0.5	0.08

$$\text{Cr equivalente} = \% \text{ Cr} + \% \text{ Mo} + 1.5 \% \text{ Si} + 0.5 \% \text{ Nb} \quad [47]$$

$$\text{Cr equivalente} = 12.3 + 0.5 + 1.5(0.45)$$

$$\text{Cr equivalente} = 13.475$$

$$\text{Ni equivalente} = \% \text{ Ni} + 30 \% \text{ C} + 30\% \text{ N} + 0.5 \% \text{ Mn} \quad [47]$$

$$\text{Ni equivalente} = 4.2 + 30(0.02) + 0.5(0.7)$$

$$\text{Ni equivalente} = 5.15$$

En el Diagrama de Schaeffler de la figura 3-2, se observa que el punto de color celeste, representa el material Base, y el punto de color naranja, representa al material de aporte, son muy cercanos, por lo cual existe poco predominio de la dilución del proceso de soldadura. Adicional se puede observar que la estructura resultante tendrá una estructura cristalina similar a las del material base.

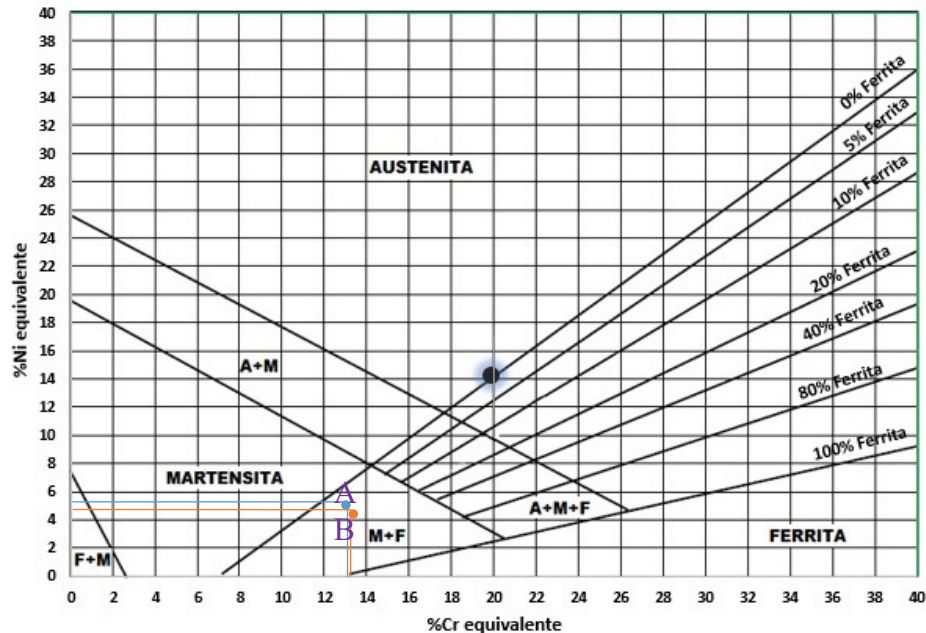


Figura 3-2: Diagrama de Schaeffler

Utilizando la expresión de Seferian, la cantidad de ferrita delta esperada en el metal de soldadura es:

$$\text{Ferrita delta} = 3(13.45 - 0.93 \times 5.3 - 6.7)$$

$$\text{Ferrita delta} = 5.46 \%$$

3.1.1.2. Parámetros del Proceso de Soldadura

El proceso de soldadura de recuperación para rodets tipo Pelton se realizará por soldadura por arco con protección gaseosa, conocido comúnmente como GTAW, en el cual se utilizará como material de aporte electrodo de acero inoxidable ER 410 NI-MO según se establece en la norma AWS 5.9, y una protección gaseosa de argón al 99.99%.

Conforme a las recomendaciones para prevenir la fisuración inducida por hidrógeno y reducir la acumulación de tensiones se realizó precalentamiento entre 80 y 120 °C. Se verifica cuál es la temperatura máxima de precalentamiento en base a la composición química y el espesor del metal base aplicando el método de Seferian.

$$T_p = 350\sqrt{C_T - 0.25}$$

Donde:

T_p : Temperatura de precalentamiento.

C_T : Carbono total equivalente

$$C_T = C_q + C_e = C_q(1 + 0.005e)$$

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

Donde:

C_q : Carbono equivalente químico.

C_e : Carbono equivalente del espesor.

e : Espesor (mm).

$$C_q(\%) = 0.044 + \frac{0.6 + 12.02}{9} + \frac{3.805}{18} + \frac{7 * 507}{90}$$

$$C_q(\%) = 1.697$$

$$C_T = 1.858 \%$$

$$T_p = 350\sqrt{1.858 - 0.25}$$

$$T_p = 443.86^\circ C$$

Para el control de la temperatura de interfase, se calcula las temperaturas de inicio y final de transformación martensítica M_s y M_f .

$$M_s = 539 - 423x(0.044) - 30.4x(0.6) - 12.1x(12.02) - 17.7x(3.805) - 7.5x(0.507)$$

$$M_s = 285.56 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$M_f \cong M_s - 130^\circ\text{C} = 285.56 - 130^\circ\text{C} = 155.56 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

La temperatura de interfase debe estar por debajo de 285 °C durante la soldadura.

En el Anexo B, se muestran los WPS de los procesos de soldadura a realizarse, en los cuales se establecen los parámetros para cada diseño.

3.1.1.3. Ejemplo de Cálculo

Ancho de ZAT

A continuación, se realizarán los ejemplos de cálculo para la Probeta 1, Pase 1.

En el proceso GTAW, la eficiencia de aporte de calor es alrededor del 50%

Energía de Entrada

$$Q = \frac{\eta * I * V}{v}$$

$$Q = \frac{0.5 * 160A * 11V}{150 \frac{mm}{min} * \frac{1 min}{60s} * \frac{1m}{1000mm}} = 352000 \text{ J/m}$$

Ancho de ZAT

$$r = \left(\frac{2}{\pi e}\right)^{1/2} \frac{Q}{2 * h * \rho * C_p (T_p - T_o)}$$

Para el acero ASTM A743, las temperaturas pico del ciclo térmico son: 1495°C, 730°C y la temperatura inicial es 80°C.

$$r_i = \left(\frac{2}{\pi e}\right)^{1/2} \frac{352000 \text{ J/m}}{2 * 0.010m * 3496000 \text{ J/m}^3 (1495 - 80)^\circ\text{C}}$$

$$r_i = 0.00172 \text{ m} = 1.72 \text{ mm}$$

$$r_f = \left(\frac{2}{\pi e}\right)^{1/2} \frac{352000 \text{ J/m}}{2 * 0.010 \text{ m} * 3496000 \text{ J/m}^3 (730 - 80)^\circ \text{C}}$$

$$r_f = 0.003765 \text{ m} = 3.76 \text{ mm}$$

Ancho ZAT : $r_f - r_i$

$$= (3.76 \text{ mm} - 1.72 \text{ mm}) = 2.044 \text{ mm}$$

Se estima según los cálculos realizados que el ancho de la ZAT sea alrededor de 2.044 mm.

Temperatura de Soldadura

$$T = T_o + \frac{q/v}{2\pi\lambda t} \exp\left(-\frac{r^2}{4at}\right)$$

La ecuación anterior se puede escribir en función de la potencia térmica efectiva, resultando en:

$$T = T_o + \frac{q/v}{h(4\pi\lambda\rho C_p t)^{1/2}} \exp\left(-\frac{r^2}{4at}\right)$$

La conductividad térmica del acero ASTM A743 Grado CA6NM es 31 W/mK

La difusividad térmica = conductividad / (densidad * calor específico) = 8.86×10^{-6} m/s

Para el cálculo de R, $z = 0$, ya que el calor se propaga a lo largo de la superficie

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$r = \sqrt{(-60\text{mm})^2 + 0^2}$; tomando en el eje de la soldadura

$$r = 60 \text{ mm} = 0.06 \text{ m}$$

$$T = (80 + 273)K$$

$$+ \frac{352000J/m/(\frac{150\text{mm}}{\text{min}})}{0.010m(4\pi * \frac{14W}{mK} * 3496000 \frac{J}{m^3K} * 24s)^{1/2}} \exp\left(-\frac{0.03^2}{4 * \frac{8.87 \times 10^{-6}m}{s} * 24s}\right)$$

$$T = 358.67 \text{ K}$$

$$T = 85.67^\circ\text{C}$$

La temperatura calcula es la obtenida en un tiempo de soldadura de 24 s, que equivale a una distancia de soldadura de 60mm.

En el presente estudio se mostrarán las temperaturas obtenidas por los diferentes pases y a diferentes distancias con respecto al eje de la fuente de soldadura.

Temperatura Pico

Para $x = 60 \text{ mm}$

$$T_{max} = T_o + \frac{1}{\pi e} \frac{Q/h}{c_p} \frac{1}{r^2}$$

$$T_{max} = (80 + 273)K + \frac{1}{\pi e} \frac{352000J/m/0.010m}{3496000J/m^3K} \frac{1}{(0.06)^2m^2}$$

$$T_{max} = 680.51 \text{ K}$$

$$T_{max} = 407.51^\circ\text{C}$$

Velocidad de Enfriamiento

$$w = 2\pi\lambda \frac{(T - T_o)^2}{q/v}$$

$$w = 2\pi * \frac{31W}{mK} \frac{(89.08 - 80)^2}{\frac{880W}{150 \frac{mm}{min} * \frac{1min}{60s} * \frac{1m}{1000m}}} =$$

$$w = 0.02 \text{ m/s}$$

Tiempo de Enfriamiento

$$t_{\frac{8}{5}} = \frac{1}{2\pi\lambda} \eta_H Q/v \left[\frac{1}{773 - T_o} - \frac{1}{1073 - T_o} \right]$$

El valor de η_H se obtiene de la tabla 1.3

$$t_{8/5} = \left(\frac{1}{2 * \pi * \frac{31J}{mK}} \right) 1 * 352000J/m / 2.5x10^{-3}m \left[\frac{1}{773 - (273 + 80)} - \frac{1}{1073 - (273 + 80)} \right]$$

$$t_{8/5} = 1.79s$$

El tiempo de enfriamiento desde una temperatura 1073 K a 773 K, es un parámetro predictor de la microestructura a obtener, un intervalo de tiempo cercano a entre 1 a 10 segundos predice una microestructura martensítica, estructura que se obtendrá en este caso de estudio.

Análisis Dimensional de Soldadura

Longitud de baño de soldadura

La temperatura de fusión del material base es 1530°C

$$L = \frac{q}{2\pi\lambda Tm}$$

$$L = \frac{880W}{2\pi * \frac{31W}{mK} * (1530 + 80)K}$$

$$L = 0.0029 m = 2.95 mm$$

Penetración del Baño de Soldadura

$$h_b = \frac{q}{8\pi\lambda Tm}$$

$$h_b = \frac{880W}{10\pi * \frac{31W}{mK} * (1530 + 80)K}$$

$$h_b = 0.0018 m = 1.8 mm$$

Ancho del Baño de Soldadura

$$A_m = 2 \frac{1}{\sqrt{2\pi e}} \frac{q/(vh)}{c_p(Tm - T_o)} h$$

$$A_m = 2 \frac{1}{\sqrt{2\pi e}} \frac{352000J/m / (150 \frac{mm}{min} * \frac{1min}{60s} * \frac{1m}{1000m}) (0.01m)}{349600 \frac{J}{m^3K} (1530 - 80)K} * 0.02m$$

$$A_m = 13.44 mm$$

Predicción Dureza

$$CE_I = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{12} + \frac{Cr}{8} + \frac{Mo}{4}$$

$$CE_I = 0.06 + \frac{1}{24} + \frac{1}{6} + \frac{4}{12} + \frac{12.75}{8} + \frac{0.7}{4}$$

$$CE_I = 2.20$$

$$CE_{II} = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{5} + \frac{Cu}{10} + \frac{Ni}{18} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{2.5} + \frac{V}{5} + \frac{Cb}{3}$$

$$CE_{II} = 0.06 + \frac{1}{24} + \frac{1}{5} + \frac{4}{18} + \frac{12.75}{5} + \frac{0.7}{2.5}$$

$$CE_{II} = 3.35$$

$$CE_{III} = C + \frac{Mn}{3.6} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{9} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4}$$

$$CE_{III} = 0.06 + \frac{1}{3.6} + \frac{4}{9} + \frac{12.75}{5} + \frac{0.7}{4}$$

$$CE_{III} = 3.51$$

$$x = \frac{\log\left(\frac{t_8}{5}\right) - 2.3CE_I - 1.35CE_{III} + 0.882}{1.15CE_I - 0.673CE_{III} - 0.601}$$

$$x = \frac{\log(1.79) - 2.3 * 2.20 - 1.35 * 3.50 + 0.882}{1.15 * 2.20 - 0.673 * 3.50 - 0.601}$$

$$x = 20.29$$

$$HV_{max} = 44.2 * C + 99CE_{II} + 206 + (402 * C - 90 * CE_{II} + 80) * \arctan(x)$$

$$HV_{max} = 44.2 * 0.06 + 99 * 3.35 + 206 + (402 * 0.06 - 90 * 3.35 + 80) * \arctan(20.259)$$

$$HV_{max} = 293.70$$

A continuación, se muestran las tablas de resultados de cálculo de temperatura de los diferentes experimentos realizados:

3.1.1.4. Energía Térmica de Soldadura

En la Tabla 3-4 se encuentran los parámetros de soldadura y en la Tabla 3- 4 se encuentran calculas la energía térmica de entrada además de la potencia de soldadura para cada una de las probetas.

Tabla 3-3: Parámetros de Soldadura

PORBETA	VOLTAJE (V)	INTENSIDAD DE CORRIENTE (A)	VELOCIDAD DE AVANCE (mm/min)	VOLTAJE (V)	INTENSIDAD DE CORRIENTE (A)	VELOCIDAD DE AVANCE (mm/min)
P01	11	160	150	11	160	150
P02	11	160	150	11	200	150
P03	11	160	200	11	160	200
P04	11	160	200	11	200	200

Fuente: Autor

Tabla 3-4: Energía de Entrada Probetas

PORBETA	PRIMER PASE					PASES 2-n				
	VOLTAJE (V)	INTENSIDAD DE CORRIENTE (A)	VELOCIDAD DE AVANCE (mm/min)	POTENCIA TÉRMICA EFECTIVA (W)	ENERGÍA TÉRMICA (J/S)	VOLTAJE (V)	INTENSIDAD DE CORRIENTE (A)	VELOCIDAD DE AVANCE (mm/min)	POTENCIA TÉRMICA EFECTIVA (W)	ENERGÍA TÉRMICA (J/S)
P01	11	160	150	880	352000	11	160	150	880	352000
P02	11	160	150	880	352000	11	200	150	1100	440000
P03	11	160	200	880	264000	11	160	200	880	264000
P04	11	160	200	880	264000	11	200	200	1100	330000

Fuente: Autor

3.1.1.5. Ancho Zona Térmicamente Afectada

Se ha calculado el ancho de la Zona Térmica Afectada de las diferentes probetas, lo cual se muestra en la Tabla 3-5.

Tabla 3-5: Ancho de Zona Térmica Afectada

# de Pase de Soldadura	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4
Pase 1	2,044	2,044	1,53	1,53
Pase 2	1,703	2,13	1,28	1,6
Pase 3	1,46	1,83	1,1	1,37
Pase 4	1,28	1,6	0,96	1,2
Pase 5	1,14	1,42	0,85	1,07
Pase 6	1,02	1,28	0,77	0,96
Pase 7	0,93	1,16	0,7	0,87
Pase 8	0,85	1,06	0,64	0,8

Fuente: Autor

Las probetas 1 y 3 tienen una intensidad de corriente de primer pase e interpase de 160 A; las probetas 2 y 4 en cambio tienen una intensidad de corriente de primer pase de 160 A e interpase de 200 A. Adicionalmente las probetas 1 y 2 poseen una velocidad de avance de soldadura menor a la de las probetas 3 y 4. Con este preámbulo se puede observar que a mayor intensidad de corriente el ancho de ZAT aumentará, por lo que es importante que el amperaje del primer pase sea bajo, de este modo no se afectará el sustrato; por el contrario una mayor velocidad de avance reduce el ancho de la ZAT al reducir la energía térmica, como se muestra en la Figura 3-3

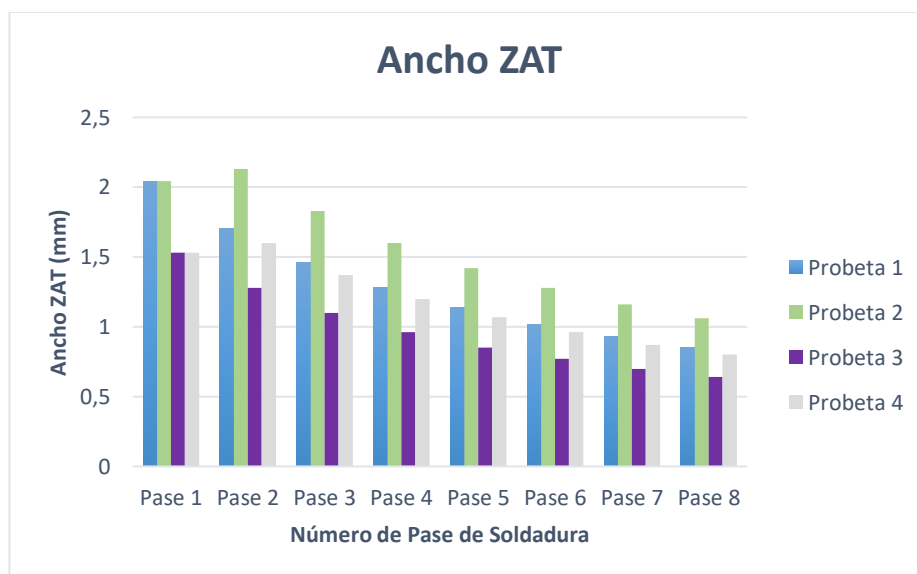


Figura 3-3: Ancho ZAT

Fuente: Autor

3.1.1.6. Distribución de Temperaturas

PROBETA 1

Tabla 3-6: Propiedades Mecánicas y Físicas Probeta 01

PROBETA #1							
CARACTERÍSTICAS DE SOLDADURA			CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL BASE				
Amperaje	160 (A)	Velocidad de avance	150 mm/min	Temperatura inicial del material base	80°C	Conductividad Térmica	31 W/mK
Voltaje	11 (V)			Espesor	10 mm	Difusividad Térmica	8,9E-06
Eficiencia de térmica	0,5					Conductividad volumétrica	3496000 J/m ³ K

Fuente: Autor

En el primer pase el espesor del material base es igual a 10mm. Se estima un total de 8 pases

Tabla 3-7: Temperaturas calculadas en función de la distancia al eje de soldadura. Probeta 01, Primer Pase

Curva 1, y = 0 mm

x (mm)	60	50	40	30	20	10	8	7	6	5	4	3	2	1
T(°C)	85,67	92,57	108,4	146,5	244,7	551,4	686,8	776,1	886,7	1028	1218	1490	1932	2891

Curva 2, y = 1 mm

x (mm)	60	50	40	30	20	10	8	7	6	5	4	3	2	1
T(°C)	85,67	92,56	108,4	146,3	244,1	548,1	681,5	769,1	877,3	1015	1198	1457	1868	2700

Curva 3, y = 2 mm

x (mm)	60	50	40	30	20	10	8	7	6	5	4	3	2	1
T(°C)	85,65	92,5	108,2	145,8	242,4	538,3	665,8	748,6	849,7	976,3	1140	1363	1689	2200

Curva 4, y = 3 mm

x (mm)	60	50	40	30	20	10	8	7	6	5	4	3	2	1
T(°C)	85,61	92,41	108	145,1	239,6	522,4	640,5	715,8	805,8	915,3	1051	1221	1429	1571

Curva 5, y = 4 mm

x (mm)	60	50	40	30	20	10	8	7	6	5	4	3	2	1
T(°C)	85,57	92,29	107,7	144	235,7	501,1	607	672,5	748,5	836,8	938,1	1048	1134	1345

Curva 6, y = 5 mm

x (mm)	60	50	40	30	20	10	8	7	6	5	4	3	2	1
T(°C)	85,51	92,14	107,2	142,7	230,8	475,2	566,8	621,2	681,4	746,6	812,3	863	848	563

Fuente: Autor

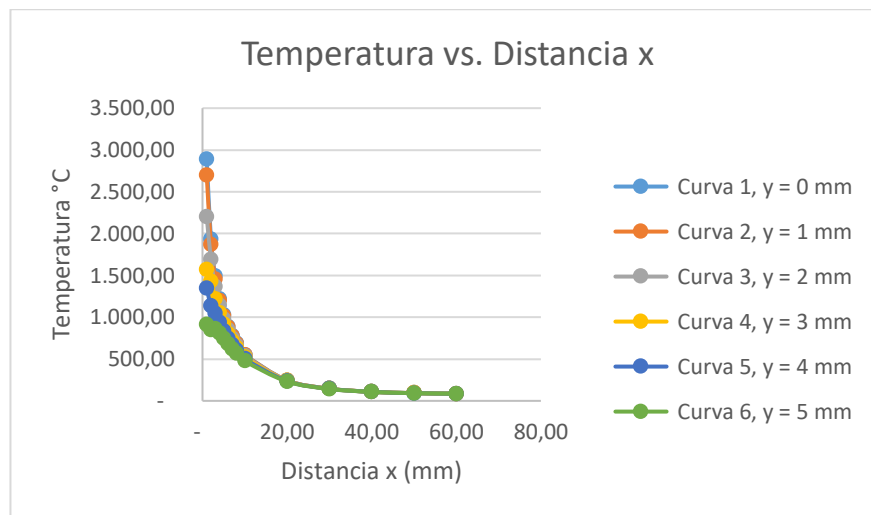


Figura 3-4: Gráfica Temperatura vs. Distancia x, Probeta 01

Fuente: Autor

La temperatura más elevada se encuentra en el punto más cercano a la fuente de soldadura, a medida que la distancia aumenta, la temperatura disminuye, de igual manera a medida que la fuente se acerca más al material base, reduciendo la distancia de arco se obtiene la mayor temperatura. En la Figura 3-4, se observa que la curva 01 tiene picos más altos de temperatura.

Temperaturas Obtenidas en Probeta #1, por Pases

A posteriori se observan los resultados de la temperatura, producto de la soldadura GTAW, para la probeta #1, se observarán y compararán las diferentes temperaturas dependiendo del número de pase.

Tabla 3-8: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 01, y = 0mm

# de pase	x (mm)	60	50	40	30	20	10	8	7	6	5	4	3	2	1
1	T(°C)	85,67	92,57	108,45	146,46	244,72	551,37	686,79	776,06	886,74	1.028,27	1.217,62	1.489,54	1.932,40	2.891,00
2		84,73	90,48	103,70	135,39	217,26	472,81	585,66	660,05	752,28	870,23	1.028,02	1.254,62	1.623,67	2.422,50
3		84,05	88,98	100,32	127,47	197,66	416,69	513,42	577,19	656,24	757,34	892,59	1.086,82	1.403,14	2.087,86
4		83,55	87,86	97,78	121,54	182,95	374,61	459,25	515,04	584,21	672,67	791,01	960,96	1.237,75	1.836,87
5		83,15	86,99	95,80	116,92	171,51	341,87	417,11	466,70	528,19	606,82	712,01	863,08	1.109,11	1.641,67
6		82,84	86,29	94,22	113,23	162,36	315,69	383,40	428,03	483,37	554,14	648,81	784,77	1.006,20	1.485,50
7		82,58	85,72	92,93	110,21	154,87	294,26	355,81	396,39	446,70	511,03	597,10	720,70	922,00	1.357,73
8		82,36	85,24	91,85	107,69	148,63	276,40	332,83	370,03	416,14	475,11	554,01	667,31	851,83	1.251,25

Fuente: Autor

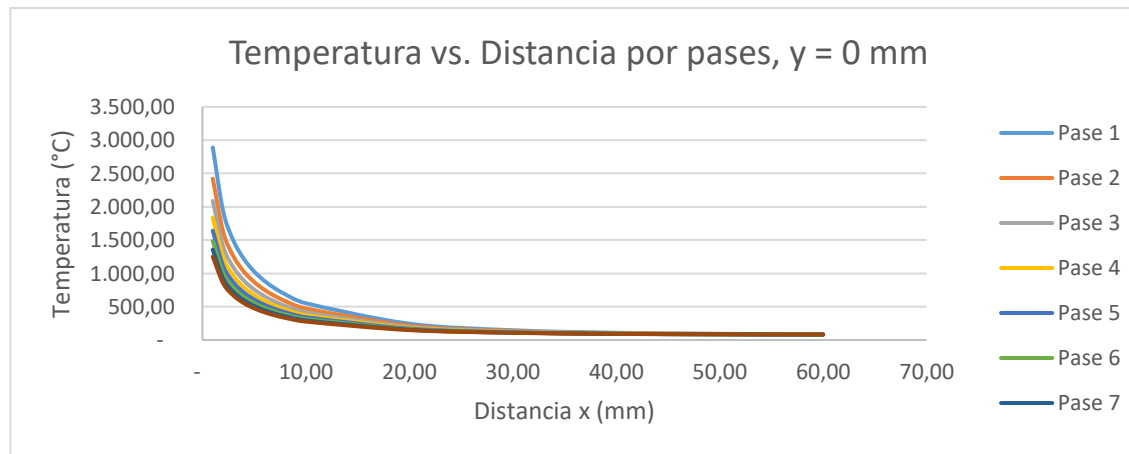


Figura 3-5: Temperatura vs. Distancia por pases, y = 0 mm, Probeta 1; Fuente: Autor

Tabla 3-9: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 01, y = 1mm

# de pase	x (mm)	60	50	40	30	20	10	8	7	6	5	4	3	2	1
1	T(°C)	85,67	92,56	108,40	146,31	244,14	548,06	681,47	769,09	877,31	1.015,00	1.197,75	1.456,81	1.868,25	2.699,69
2		84,72	90,46	103,66	135,26	216,78	470,05	581,22	654,24	744,43	859,16	1.011,46	1.227,34	1.570,21	2.263,07
3		84,05	88,97	100,28	127,36	197,24	414,33	509,62	572,20	649,51	747,86	878,39	1.063,44	1.357,32	1.951,21
4		83,54	87,85	97,75	121,44	182,59	372,54	455,92	510,68	578,32	664,37	778,60	940,51	1.197,66	1.717,31
5		83,15	86,98	95,78	116,84	171,19	340,03	414,15	462,83	522,95	599,44	700,97	844,90	1.073,47	1.535,38
6		82,83	86,28	94,20	113,15	162,07	314,03	380,73	424,54	478,66	547,50	638,88	768,41	974,13	1.389,84
7		82,58	85,71	92,91	110,14	154,61	292,76	353,40	393,22	442,42	505,00	588,07	705,82	892,84	1.270,77
8		82,36	85,23	91,83	107,63	148,39	275,03	330,61	367,12	412,21	469,58	545,73	653,67	825,11	1.171,54

Fuente: Autor

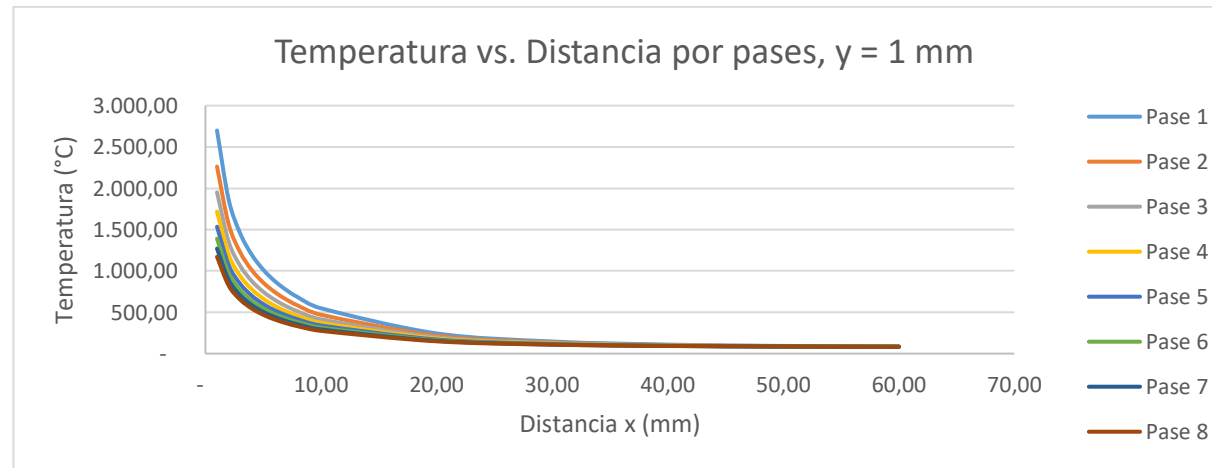


Figura 3-6: Temperatura vs. Distancia por pases, y = 1 mm, Probeta 1; Fuente: Autor

Tabla 3-10: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 01, y = 2mm

# de pase	x (mm)	60	50	40	30	20	10	8	7	6	5	4	3	2	1
1	T(°C)	85,65	92,50	108,25	145,84	242,41	538,27	665,78	748,58	849,70	976,28	1.140,20	1.363,11	1.688,84	2.200,40
2		84,70	90,42	103,54	134,87	215,34	461,89	568,15	637,15	721,42	826,90	963,50	1.149,26	1.420,70	1.847,00
3		84,03	88,93	100,18	127,03	196,01	407,33	498,41	557,56	629,79	720,20	837,29	996,51	1.229,17	1.594,57
4		83,53	87,81	97,65	121,15	181,51	366,42	446,11	497,86	561,07	640,18	742,62	881,94	1.085,53	1.405,25
5		83,14	86,95	95,69	116,58	170,23	334,59	405,43	451,43	507,61	577,93	669,00	792,84	973,80	1.258,00
6		82,82	86,25	94,12	112,92	161,21	309,13	372,89	414,29	464,85	528,14	610,10	721,56	884,42	1.140,20
7		82,57	85,68	92,84	109,93	153,82	288,30	346,26	383,90	429,87	487,40	561,91	663,23	811,29	1.043,82
8		82,35	85,21	91,77	107,43	147,67	270,94	324,08	358,58	400,71	453,45	521,75	614,63	750,35	963,50

Fuente: Autor

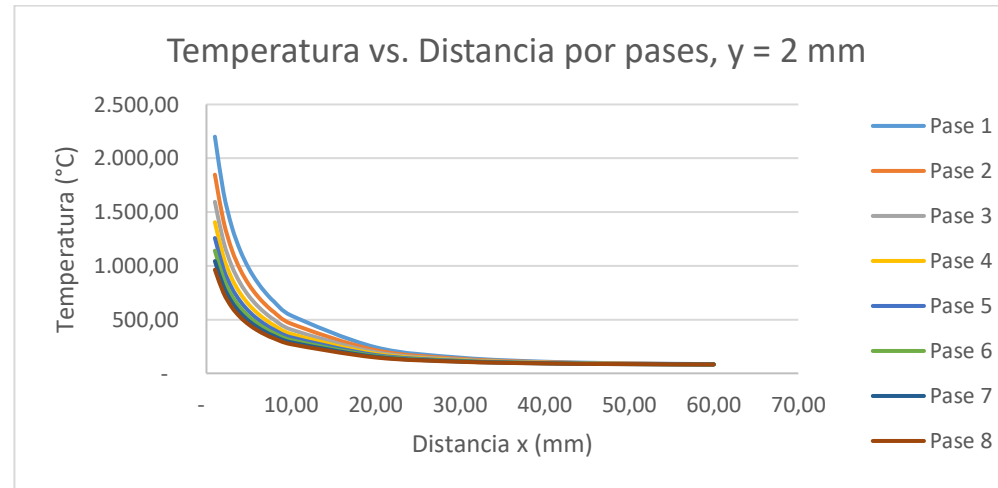


Figura 3-7: Temperatura vs. Distancia por pases, y = 2 mm, Probeta 1; Fuente: Autor

Tabla 3-11: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 01, y = 3mm

# de pase	x (mm)	60	50	40	30	20	10	8	7	6	5	4	3	2	1
1	T(°C)	85,61	92,41	108,00	145,07	239,58	522,40	640,54	715,76	805,80	915,28	1.050,79	1.220,90	1.428,92	1.570,61
2		84,68	90,35	103,33	134,23	212,98	448,67	547,11	609,80	684,83	776,07	888,99	1.030,75	1.204,10	1.322,17
3		84,01	88,87	100,00	126,48	193,98	396,00	480,38	534,11	598,43	676,63	773,42	894,93	1.043,51	1.144,72
4		83,51	87,76	97,50	120,67	179,73	356,50	430,33	477,35	533,62	602,05	686,74	793,06	923,08	1.011,63
5		83,12	86,90	95,55	116,15	168,65	325,78	391,41	433,20	483,22	544,05	619,33	713,83	829,40	908,12
6		82,81	86,21	94,00	112,54	159,79	301,20	360,27	397,88	442,90	497,64	565,39	650,45	754,46	825,30
7		82,55	85,64	92,73	109,58	152,53	281,09	334,79	368,98	409,91	459,67	521,27	598,59	693,15	757,55
8		82,34	85,17	91,67	107,11	146,49	264,33	313,56	344,90	382,42	428,03	484,49	555,37	642,05	701,09

Fuente: Autor

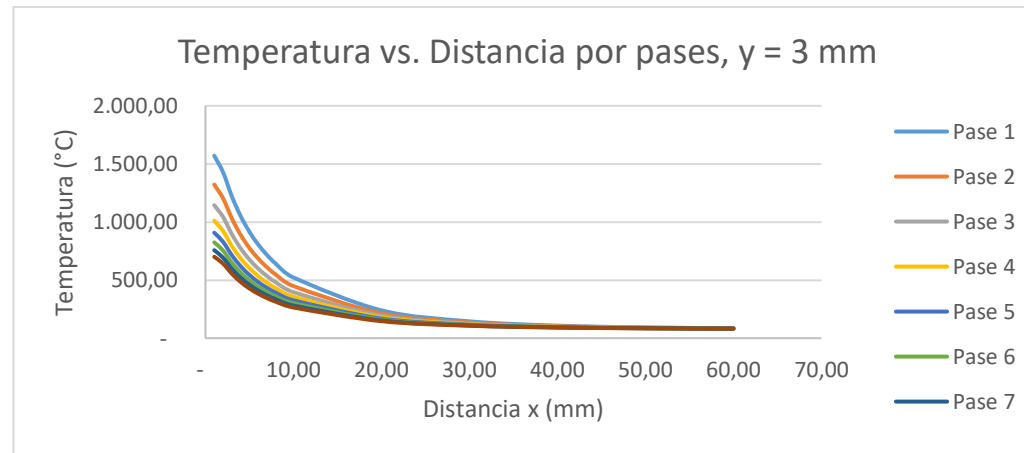


Figura 3-8: Temperatura vs. Distancia por pases, y = 3 mm, Probeta 1; Fuente: Autor

Tabla 3-12: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 01, y = 4mm

# de pase	x (mm)	60	50	40	30	20	10	8	7	6	5	4	3	2	1
1	T(°C)	85,57	92,29	107,65	144,01	235,69	501,10	607,01	672,49	748,50	836,79	938,13	1.047,88	1.134,02	990,10
2		84,64	90,24	103,05	133,34	209,74	430,92	519,17	573,74	637,08	710,66	795,11	886,57	958,35	838,42
3		83,98	88,78	99,75	125,72	191,21	380,79	456,44	503,21	557,50	620,57	692,95	771,34	832,87	730,07
4		83,48	87,68	97,28	120,01	177,30	343,19	409,38	450,30	497,81	553,00	616,33	684,92	738,76	648,81
5		83,09	86,83	95,36	115,56	166,49	313,95	372,78	409,16	451,39	500,44	556,74	617,71	665,57	585,61
6		82,78	86,15	93,83	112,01	157,84	290,55	343,50	376,24	414,25	458,40	509,07	563,94	607,01	535,05
7		82,53	85,59	92,57	109,10	150,77	271,41	319,55	349,31	383,86	424,00	470,06	519,94	559,10	493,68
8		82,32	85,12	91,52	106,67	144,87	255,46	299,59	326,87	358,54	395,33	437,56	483,28	519,17	459,21

Fuente: Autor

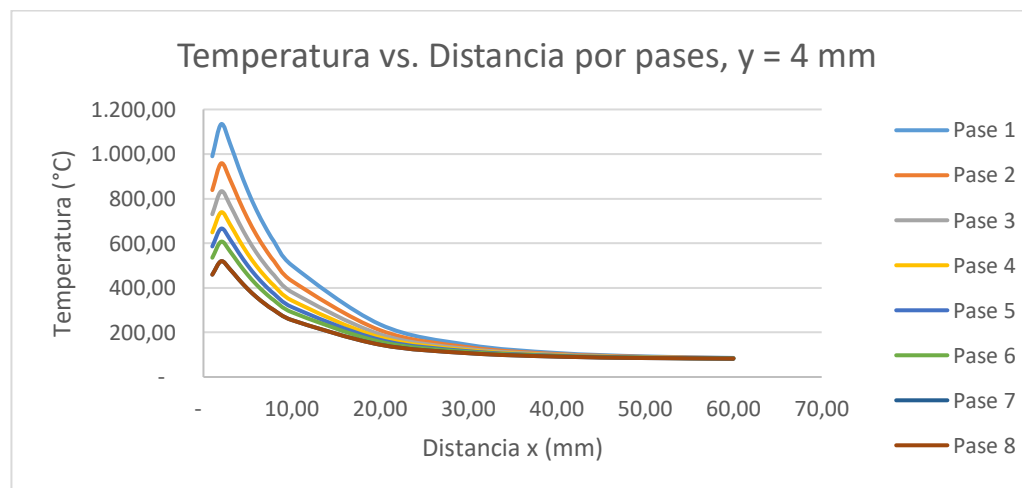


Figura 3-9: Temperatura vs. Distancia por pases, y = 4 mm, Probeta 1; Fuente: Autor

Tabla 3-13: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 01, y = 5mm

# de pase	x (mm)	60	50	40	30	20	10	8	7	6	5	4	3	2	1
1	T (°C)	85,51	92,14	107,22	142,67	230,83	475,22	566,83	621,16	681,43	746,62	812,29	863,41	847,54	562,60
2		84,59	90,11	102,68	132,23	205,69	409,35	485,70	530,96	581,19	635,52	690,24	732,84	719,62	482,17
3		83,93	88,67	99,44	124,77	187,73	362,30	427,74	466,54	509,59	556,16	603,06	639,58	628,24	424,72
4		83,44	87,59	97,01	119,17	174,27	327,01	384,27	418,22	455,89	496,64	537,68	569,63	559,71	381,63
5		83,06	86,74	95,12	114,82	163,79	299,57	350,46	380,64	414,13	450,34	486,83	515,23	506,41	348,11
6		82,75	86,07	93,61	111,34	155,41	277,61	323,42	350,58	380,72	413,31	446,14	471,70	463,77	321,30
7		82,50	85,52	92,37	108,49	148,56	259,64	301,29	325,98	353,38	383,01	412,86	436,10	428,88	299,37
8		82,30	85,06	91,34	106,11	142,84	244,67	282,85	305,48	330,60	357,76	385,12	406,42	399,81	281,09

Fuente: Autor

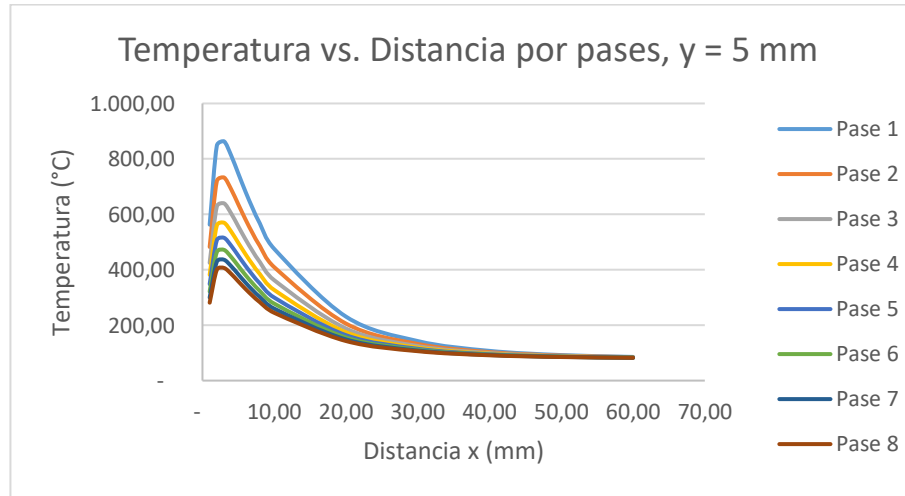


Figura 3-10: Temperatura vs. Distancia por pases, y = 5 mm, Probeta 1; Fuente: Autor

Según la información calculada se puede observar que los picos de temperatura se producen en el primer pase, que es recurrente con la información recopilada, ya que el primer pase es crítico para el material base, y se deben controlar parámetros de soldadura para no permitir que la temperatura exceda. En este procedimiento la temperatura inicial como se indicó es de 80°C, la cual se controla durante todo el proceso, y se convierte en temperatura interpase.

Después de cada pase de soldadura se debe esperar el tiempo necesario para que la probeta recupere la temperatura de 80°C, una vez ello se procede con el siguiente pase, hasta finalizar el proceso de soldadura por revenido.

Cuando $y = 0$ mm, la temperatura pico máxima es 2891°C, cuando el punto se localiza a 1 mm de la fuente de soldadura; cuando $y = 1$ mm la temperatura máxima es 2699.69°C, cuando $y = 2$ mm se obtiene una temperatura máxima de 2200.40°C, cuando $y = 3$ mm la temperatura máxima es 1570.61°C. Según los datos obtenidos se analiza que en intervalo de zona ZAT (3mm) las temperaturas son muy altas, lo que contribuye a la deformación de granos y difusión de carbono para adoptar estructuras cristalinas de alta dureza, pero muy frágiles, que perjudicarán el desempeño del elemento mecánico.

A partir de $y = 4$ mm se observan las típicas curvas de Distribución de Temperatura en la cual los picos de temperatura se obtienen cuando la distancia desde la fuente al material base es de 2mm, igualmente correspondiente a la ZAT.

La Figura 3-11 y Figura 3-12, representa el análisis comparativo de temperatura según el número de pase correspondiente para $x = 2$ mm, pudiendo observar de manera más claro que a medida que la fuente se distancia del material base la temperatura disminuye considerablemente, obteniéndose una reducción del 3% desde $y = 0$ mm a $y = 1$ mm; 10% desde $y = 1$ mm a $y = 2$ mm; 15% desde $y = 2$ mm a $y = 3$ mm; 21% desde $y = 3$ mm a $y = 4$ mm, 25% desde $y = 4$ mm a $y = 5$ mm

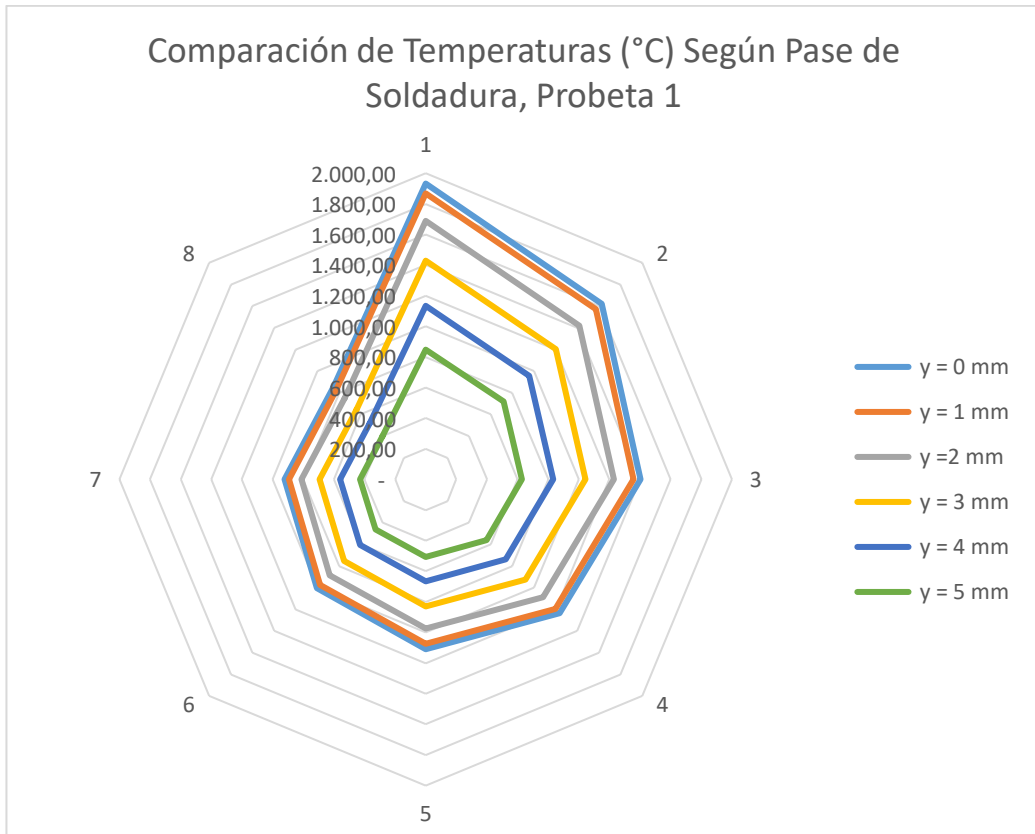


Figura 3-11: Distribución de Temperaturas por Pase, Probeta 1

Fuente: Autor

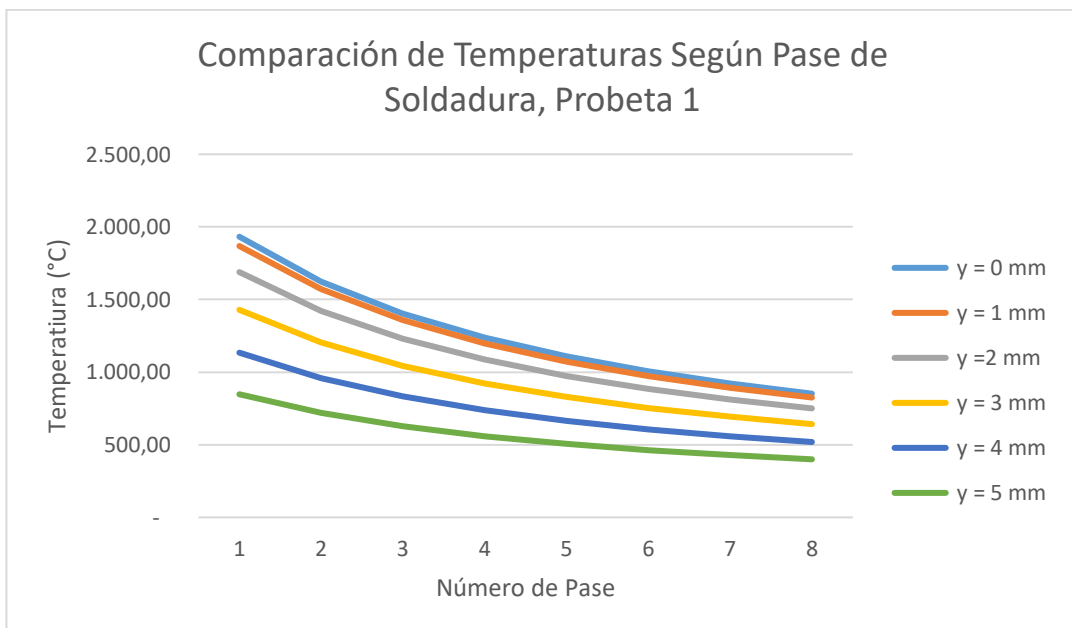


Figura 3-12: Distribución de Temperaturas por Pase, Probeta 1

Fuente: Autor

PROBETA 2

Tabla 3-14: Propiedades Mecánicas y Físicas Probeta 02

PROBETA #2							
CARACTERÍSTICAS DE SOLDADURA			CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL BASE				
Amperaje	160 (A)	Amperaje Interpase	200 (A)	Temperatura inicial del material base	80°C	Conductividad Térmica	31 W/mK
Voltaje	11 (V)	Velocidad de avance	150 mm/min	Espesor	10 mm	Difusividad Térmica	8,9E-06
Eficiencia de térmica	0,5					Conductividad volumétrica	3496000 J/m ³ K

Fuente: Autor

En el primer pase el espesor del material base es igual a 10mm. Se estima un total de 8 pases

Tabla 3-15: Temperaturas calculas en función de la distancia al eje de soldadura. Probeta 02, Primer Pase

Curva 1, y = 0 mm

x (mm)	60,00	50,00	40,00	30,00	20,00	10,00	8,00	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	2,00	1,00
T (°C)	85,67	92,57	108,45	146,46	244,72	551,37	686,79	776,06	886,74	1.028,27	1.217,62	1.489,54	1.932,40	2.891,00

Curva 2, y = 1 mm

x (mm)	60,00	50,00	40,00	30,00	20,00	10,00	8,00	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	2,00	1,00
T (°C)	85,67	92,56	108,40	146,31	244,14	548,06	681,47	769,09	877,31	1.015,00	1.197,75	1.456,81	1.868,25	2.699,69

Curva 3, y = 2 mm

x (mm)	60,00	50,00	40,00	30,00	20,00	10,00	8,00	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	2,00	1,00
T (°C)	85,65	92,50	108,25	145,84	242,41	538,27	665,78	748,58	849,70	976,28	1.140,20	1.363,11	1.688,84	2.200,40

Curva 4, y = 3 mm

x (mm)	60,00	50,00	40,00	30,00	20,00	10,00	8,00	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	2,00	1,00
T (°C)	85,61	92,41	108,00	145,07	239,58	522,40	640,54	715,76	805,80	915,28	1.050,79	1.220,90	1.428,92	1.570,61

Curva 5, y = 4 mm

x (mm)	60,00	50,00	40,00	30,00	20,00	10,00	8,00	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	2,00	1,00
T (°C)	85,57	92,29	107,65	144,01	235,69	501,10	607,01	672,49	748,50	836,79	938,13	1.047,88	1.134,02	990,10

Curva 6, y = 5 mm

x (mm)	60,00	50,00	40,00	30,00	20,00	10,00	8,00	7,00	6,00	5,00	4,00	3,00	2,00	1,00
T (°C)	85,51	92,14	107,22	142,67	230,83	475,22	566,83	621,16	681,43	746,62	812,29	863,41	847,54	562,60

Fuente: Autor

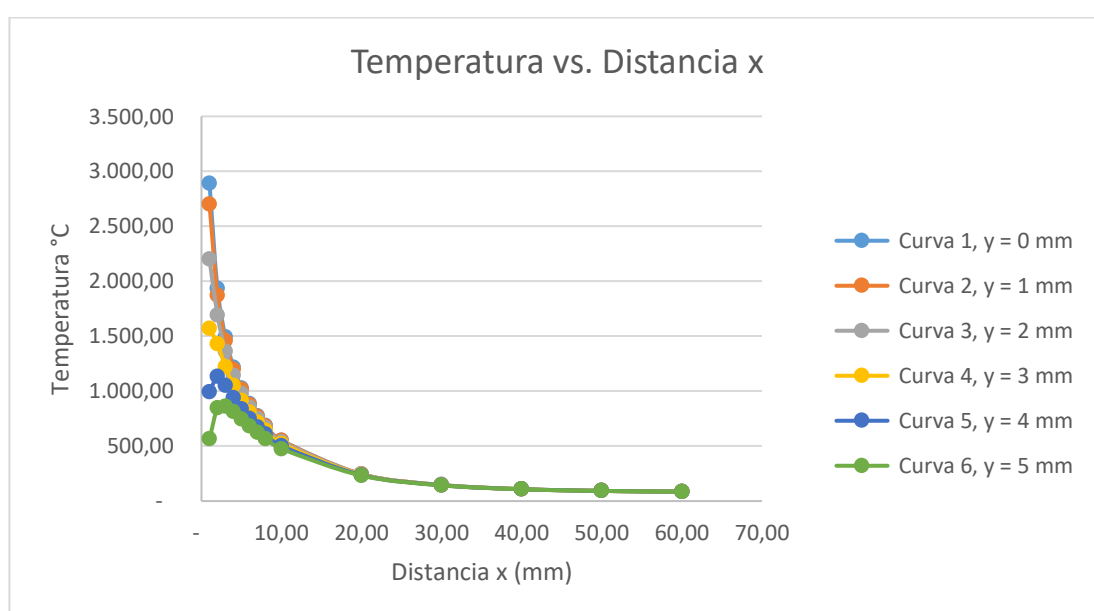


Figura 3-13: Gráfica Temperatura vs. Distancia x, Probeta 02

Fuente: Autor

En la Figura 3-13, se observa que la curva 01 tiene picos más altos de temperatura, Se observa temperaturas mayores que las obtenidas con en la probeta 01, debido al mayor amperaje en la soldadura interfase.

Temperaturas Obtenidas en Probeta #2, por Pases

A posteriori se observan los resultados de la temperatura, producto de la soldadura GTAW, para la probeta #2, se observarán y compararán las diferentes temperaturas dependiendo del número de pase.

Tabla 3-16: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 02, y = 0mm

# de pase	x (mm)	60	50	40	30	20	10	8	7	6	5	4	3	2	1
1	T(°C)	85,67	92,57	108,45	146,46	244,72	551,37	686,79	776,06	886,74	1.028,27	1.217,62	1.489,54	1.932,40	2.891,00
2		85,91	93,10	109,63	149,23	251,58	571,01	712,08	805,06	920,35	1.067,78	1.265,02	1.548,27	2.009,58	3.008,12
3		85,06	91,23	105,40	139,34	227,07	500,87	621,78	701,48	800,30	926,67	1.095,73	1.338,52	1.733,93	2.589,82
4		84,43	89,82	102,22	131,93	208,69	448,26	554,06	623,80	710,26	820,84	968,77	1.181,21	1.527,19	2.276,09
5		83,94	88,73	99,75	126,16	194,39	407,34	501,38	563,38	640,23	738,52	870,02	1.058,85	1.366,39	2.032,08
6		83,55	87,86	97,78	121,54	182,95	374,61	459,25	515,04	584,21	672,67	791,01	960,96	1.237,75	1.836,87
7		83,22	87,14	96,16	117,76	173,59	347,82	424,77	475,49	538,37	618,79	726,38	880,88	1.132,50	1.677,16
8		82,95	86,55	94,82	114,62	165,79	325,51	396,04	442,53	500,17	573,89	672,51	814,14	1.044,79	1.544,06

Fuente: Autor

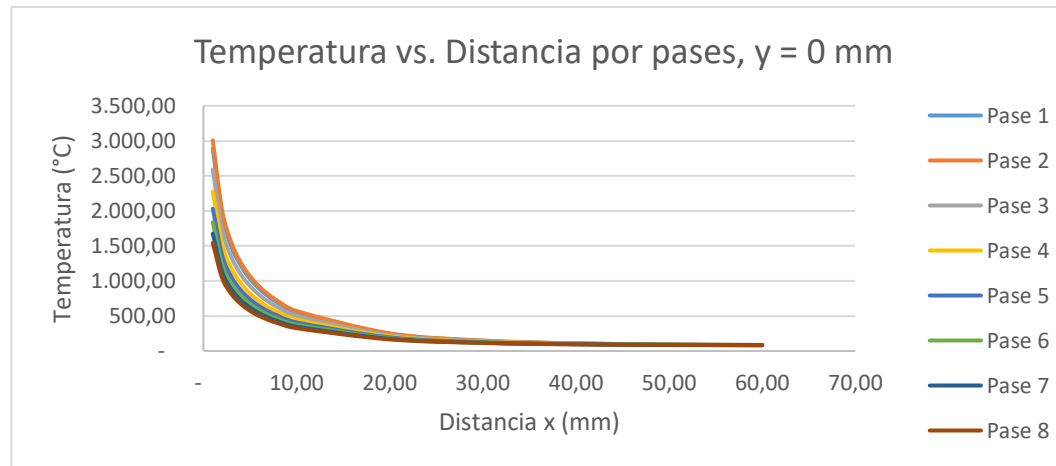


Figura 3-14: Temperatura vs. Distancia por pases, y = 0 mm, Probeta 2; Fuente: Autor

Tabla 3-17: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 02, y = 1mm

# de pase	x (mm)	60	50	40	30	20	10	8	7	6	5	4	3	2	1
1	T(°C)	85,67	92,56	108,40	146,31	244,14	548,06	681,47	769,09	877,31	1.015,00	1.197,75	1.456,81	1.868,25	2.699,69
2		85,90	93,08	109,58	149,07	250,98	567,56	706,53	797,80	910,54	1.053,96	1.244,33	1.514,18	1.942,76	2.808,84
3		85,06	91,21	105,35	139,20	226,55	497,91	617,03	695,26	791,89	914,82	1.077,99	1.309,30	1.676,66	2.419,01
4		84,43	89,81	102,18	131,80	208,23	445,67	549,90	618,35	702,90	810,47	953,24	1.155,63	1.477,07	2.126,63
5		83,93	88,72	99,72	126,05	193,99	405,04	497,69	558,53	633,69	729,30	856,22	1.036,12	1.321,84	1.899,23
6		83,54	87,85	97,75	121,44	182,59	372,54	455,92	510,68	578,32	664,37	778,60	940,51	1.197,66	1.717,31
7		83,22	87,13	96,13	117,68	173,26	345,94	421,74	471,53	533,02	611,25	715,09	862,28	1.096,05	1.568,46
8		82,95	86,54	94,79	114,54	165,49	323,78	393,27	438,90	495,27	566,98	662,16	797,09	1.011,38	1.444,42

Fuente: Autor

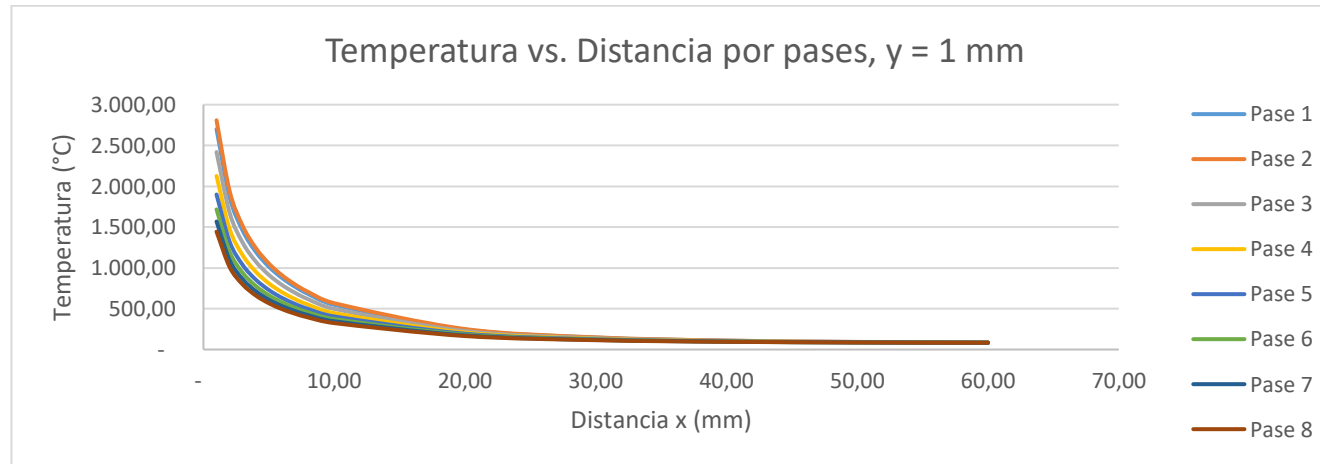


Figura 3-15: Temperatura vs. Distancia por pases, y = 1 mm, Probeta 2; Fuente: Autor

Tabla 3-18: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 02, y = 2mm

# de pase	x (mm)	60	50	40	30	20	10	8	7	6	5	4	3	2	1
1	T(°C)	108,25	145,84	242,41	538,27	665,78	748,58	849,70	976,28	1.140,20	1.363,11	1.688,84	2.200,40	2.423,12	1.999,01
2		109,42	148,59	249,18	557,36	690,19	776,44	881,78	1.013,63	1.184,37	1.416,57	1.755,88	2.288,75	2.520,75	2.078,96
3		105,22	138,79	225,01	489,17	603,02	676,95	767,24	880,25	1.026,61	1.225,63	1.516,47	1.973,21	2.172,07	1.793,40
4		102,07	131,44	206,88	438,02	537,64	602,33	681,33	780,22	908,28	1.082,43	1.336,91	1.736,56	1.910,56	1.579,22
5		99,61	125,72	192,79	398,24	486,79	544,29	614,52	702,42	816,25	971,05	1.197,25	1.552,50	1.707,17	1.412,64
6		97,65	121,15	181,51	366,42	446,11	497,86	561,07	640,18	742,62	881,94	1.085,53	1.405,25	1.544,45	1.279,38
7		96,05	117,41	172,28	340,38	412,83	459,88	517,33	589,25	682,39	809,04	994,11	1.284,77	1.411,32	1.170,34
8		94,71	114,29	164,59	318,68	385,09	428,22	480,89	546,81	632,19	748,29	917,94	1.184,37	1.300,38	1.079,48

Fuente: Autor

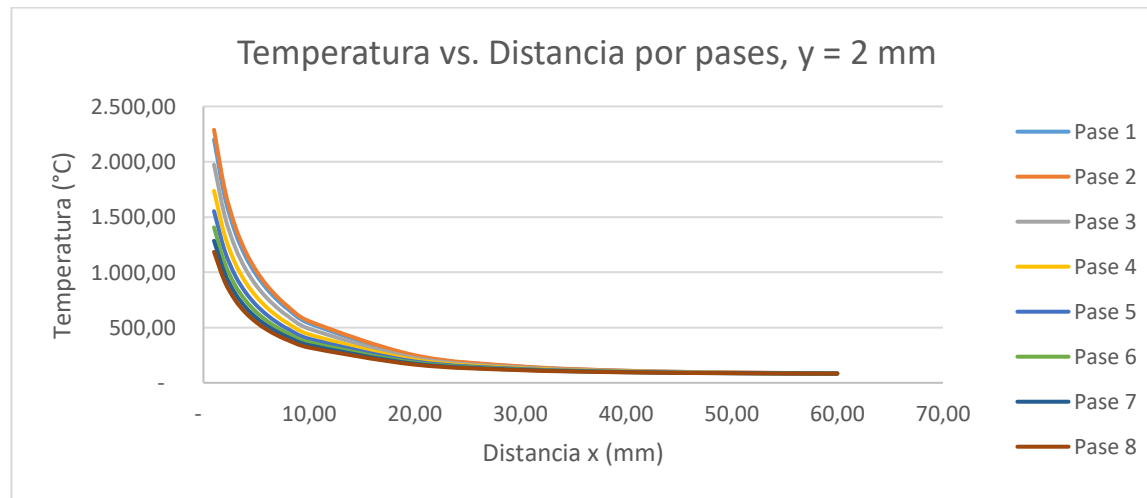


Figura 3-16: Temperatura vs. Distancia por pases, y = 2 mm, Probeta 2; Fuente: Autor

Tabla 3-19: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 02, y = 3mm

# de pase	x (mm)	60	50	40	30	20	10	8	7	6	5	4	3	2	1
1	T(°C)	85,61	92,41	108,00	145,07	239,58	522,40	640,54	715,76	805,80	915,28	1.050,79	1.220,90	1.428,92	1.570,61
2		85,85	92,93	109,16	147,78	246,22	540,83	663,89	742,25	836,04	950,09	1.091,24	1.268,43	1.485,13	1.632,72
3		85,01	91,08	105,00	138,10	222,48	475,00	580,48	647,64	728,03	825,79	946,77	1.098,66	1.284,39	1.410,90
4		84,38	89,70	101,87	130,84	204,67	425,62	517,92	576,68	647,03	732,56	838,43	971,32	1.133,84	1.244,54
5		83,90	88,62	99,44	125,19	190,82	387,22	469,26	521,50	584,03	660,06	754,16	872,29	1.016,75	1.115,14
6		83,51	87,76	97,50	120,67	179,73	356,50	430,33	477,35	533,62	602,05	686,74	793,06	923,08	1.011,63
7		83,19	87,05	95,91	116,97	170,67	331,36	398,49	441,22	492,38	554,59	631,58	728,24	846,43	926,94
8		82,92	86,47	94,58	113,89	163,11	310,42	371,95	411,12	458,02	515,04	585,62	674,22	782,56	856,36

Fuente: Autor

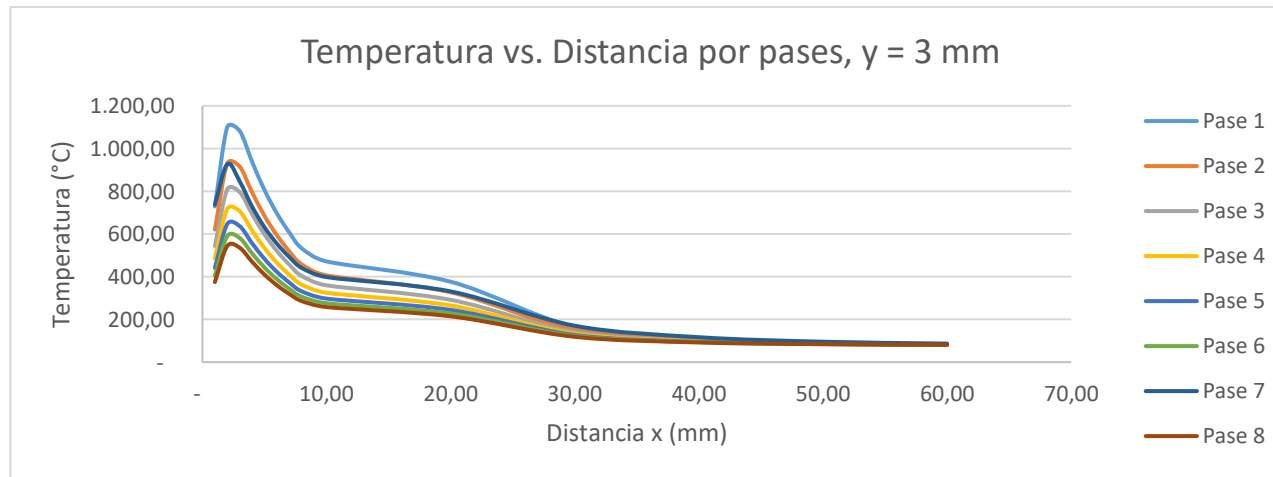


Figura 3-17: Temperatura vs. Distancia por pases, y = 3 mm, Probeta 2; Fuente: Autor

Tabla 3-20: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 02, y = 4mm

# de pase	x (mm)	60	50	40	30	20	10	8	7	6	5	4	3	2	1
1	T(°C)	85,57	92,29	107,65	144,01	235,69	501,10	607,01	672,49	748,50	836,79	938,13	1.047,88	1.134,02	990,10
2		85,80	92,81	108,81	146,68	242,17	518,65	628,97	697,17	776,36	868,33	973,89	1.088,21	1.177,94	1.028,02
3		84,97	90,98	104,69	137,15	219,01	455,98	550,54	609,01	676,88	755,71	846,19	944,18	1.021,09	892,59
4		84,35	89,60	101,61	130,01	201,63	408,99	491,73	542,88	602,27	671,25	750,42	836,16	903,45	791,01
5		83,87	88,54	99,20	124,45	188,12	372,43	445,98	491,45	544,24	605,55	675,93	752,14	811,96	712,01
6		83,48	87,68	97,28	120,01	177,30	343,19	409,38	450,30	497,81	553,00	616,33	684,92	738,76	648,81
7		83,16	86,98	95,71	116,37	168,46	319,26	379,44	416,64	459,83	510,00	567,58	629,93	678,87	597,10
8		82,90	86,40	94,40	113,34	161,09	299,32	354,48	388,59	428,18	474,16	526,94	584,10	628,97	554,01

Fuente: Autor

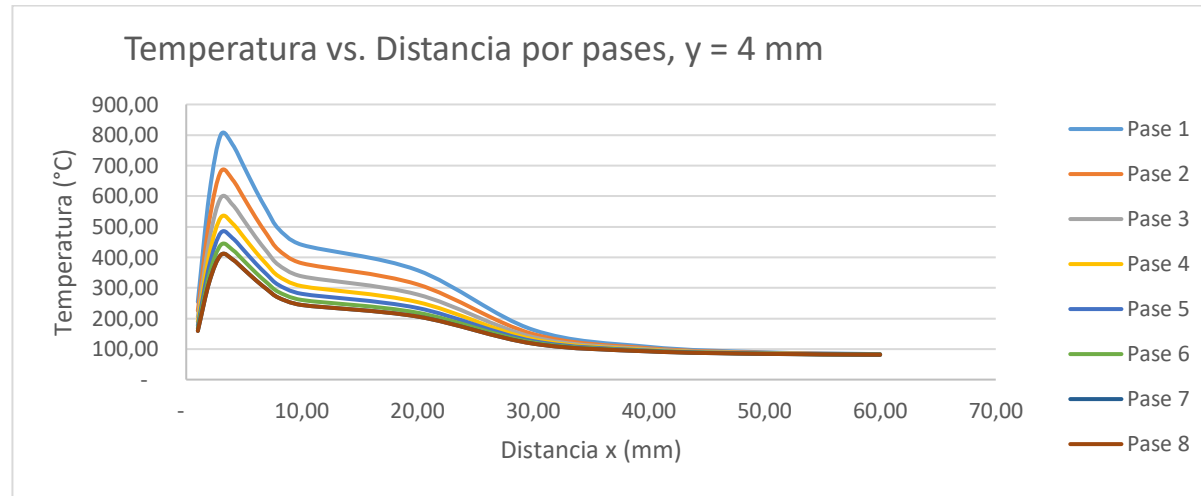


Figura 3-18: Temperatura vs. Distancia por pases, y = 4 mm, Probeta 2; Fuente: Autor

Tabla 3-21: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 02, y = 5mm

# de pase	x (mm)	60	50	40	30	20	10	8	7	6	5	4	3	2	1
1	T(°C)	85,51	92,14	107,22	142,67	230,83	475,22	566,83	621,16	681,43	746,62	812,29	863,41	847,54	562,60
2		85,74	92,64	108,35	145,28	237,11	491,69	587,12	643,70	706,49	774,40	842,80	896,05	879,52	582,71
3		84,92	90,84	104,30	135,96	214,67	432,87	514,67	563,18	616,99	675,20	733,83	779,47	765,30	510,90
4		84,30	89,48	101,27	128,96	197,83	388,76	460,34	502,78	549,87	600,80	652,10	692,04	679,64	457,03
5		83,83	88,43	98,90	123,52	184,74	354,46	418,08	455,80	497,66	542,93	588,53	624,03	613,01	415,14
6		83,44	87,59	97,01	119,17	174,27	327,01	384,27	418,22	455,89	496,64	537,68	569,63	559,71	381,63
7		83,13	86,90	95,47	115,61	165,70	304,56	356,61	387,48	421,72	458,76	496,07	525,12	516,10	354,21
8		82,87	86,32	94,18	112,64	158,56	285,84	333,56	361,85	393,25	427,20	461,40	488,03	479,76	331,36

Fuente: Autor

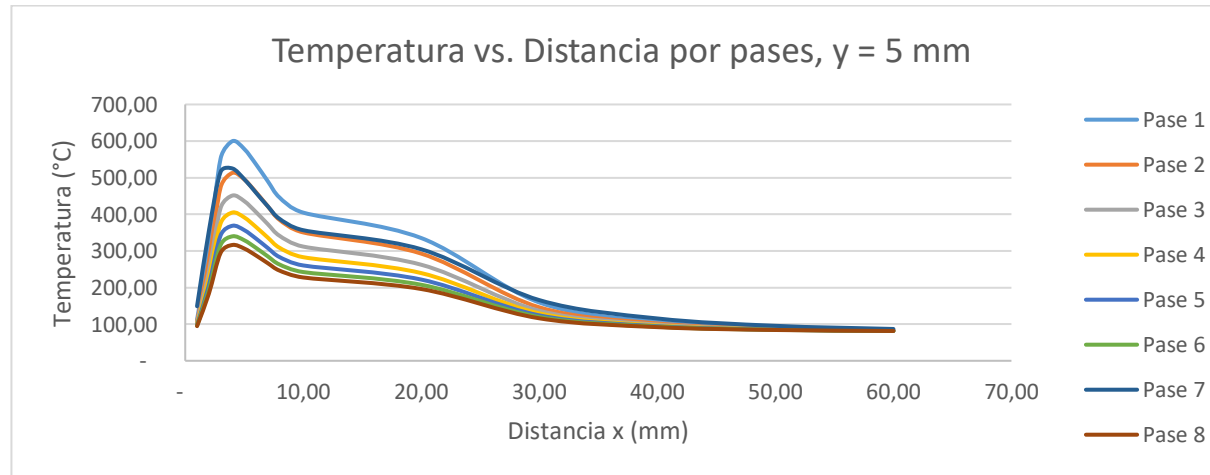


Figura 3-19: Temperatura vs. Distancia por pases, y = 5 mm, Probeta 2; Fuente: Autor

En este procedimiento la temperatura inicial como se indicó es de 80°C, la cual se controla durante todo el proceso, y se convierte en temperatura interpase.

Después de cada pase de soldadura se debe esperar el tiempo necesario para que la probeta recupere la temperatura de 80°C, una vez ello se procede con el siguiente pase, hasta finalizar el proceso de soldadura por revenido.

Las temperaturas del primer pase, son iguales a las de la probeta 1, debido a que trabaja con las mismas condiciones de soldadura, de lo que se obtiene:

Cuando $y = 0$, la temperatura pico máxima es 2891°C, cuando el punto se localiza a 1 mm de la fuente de soldadura; cuando $y = 0$ la temperatura máxima es 2669.69°C, cuando $y = 2$ se obtiene una temperatura máxima de 2200.40°C, cuando $y = 3$ mm la temperatura máxima es 1570.61°C, cuando $y = 4$ mm $T = 1134.02^\circ\text{C}$, y cuando $y = 5$ mm la máxima temperatura encontrada es de 874.54°C.

Desde la Figura 3-19 se observa que la soldadura arranca con una temperatura, llega a un pico y nuevamente disminuye hasta llegar a la temperatura de control que es 80°C. El control se lo realiza mediante un pirómetro, con el cual se realiza el test de temperatura en la zona de soldadura y zonas aledañas.

Adicionalmente se puede observar en los cálculos que a una distancia $x = 3$ mm se obtienen los puntos máximos de temperatura.

La Figura 3-20 y Figura 3-21, representa el análisis comparativo de temperatura según el número de pase correspondiente para $x = 2$ mm, pudiendo observar de manera más claro que a medida que la fuente se distancia del material base la temperatura disminuye considerablemente, obteniéndose una reducción del 2% desde $y = 0$ mm a $y = 1$ mm; 5% desde $y = 1$ mm a $y = 2$ mm; 8% desde $y = 2$ mm a $y = 3$ mm; 11% desde $y = 3$ mm a $y = 4$ mm, 13% desde $y = 4$ mm a $y = 5$ mm.

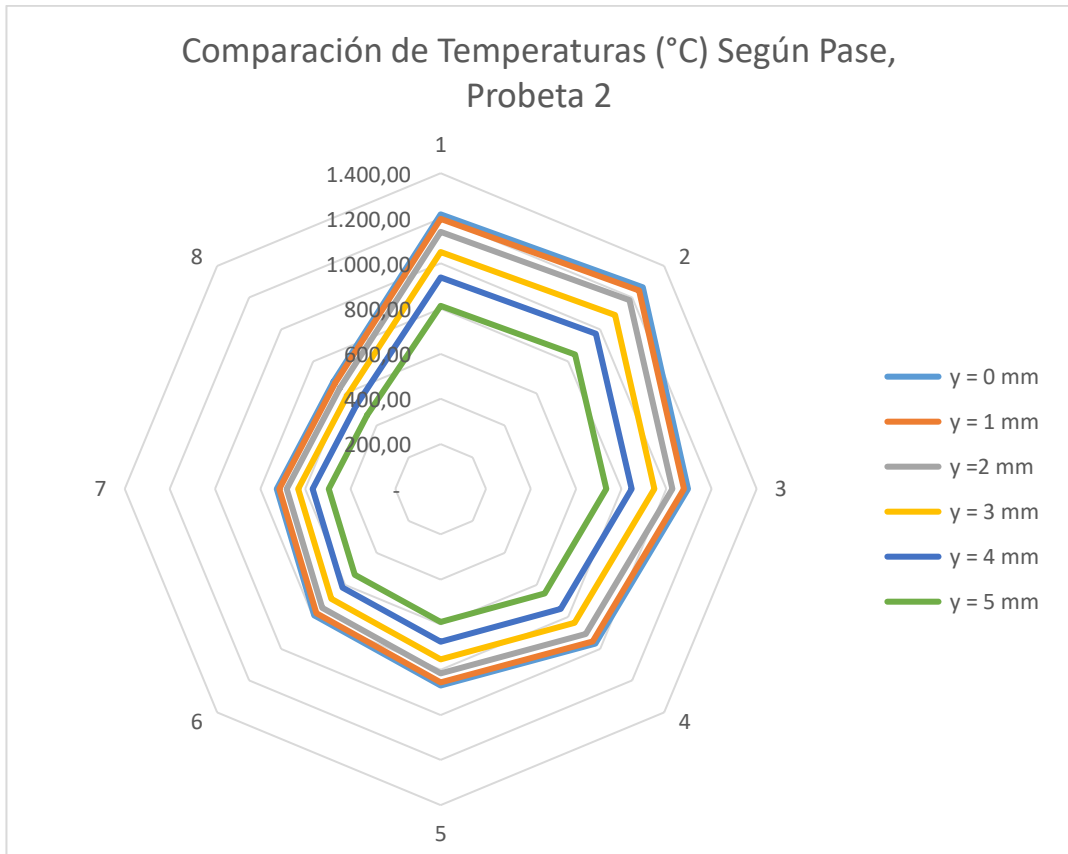


Figura 3-20: Distribución de Temperaturas por Pase, Probeta 2
Fuente: Autor

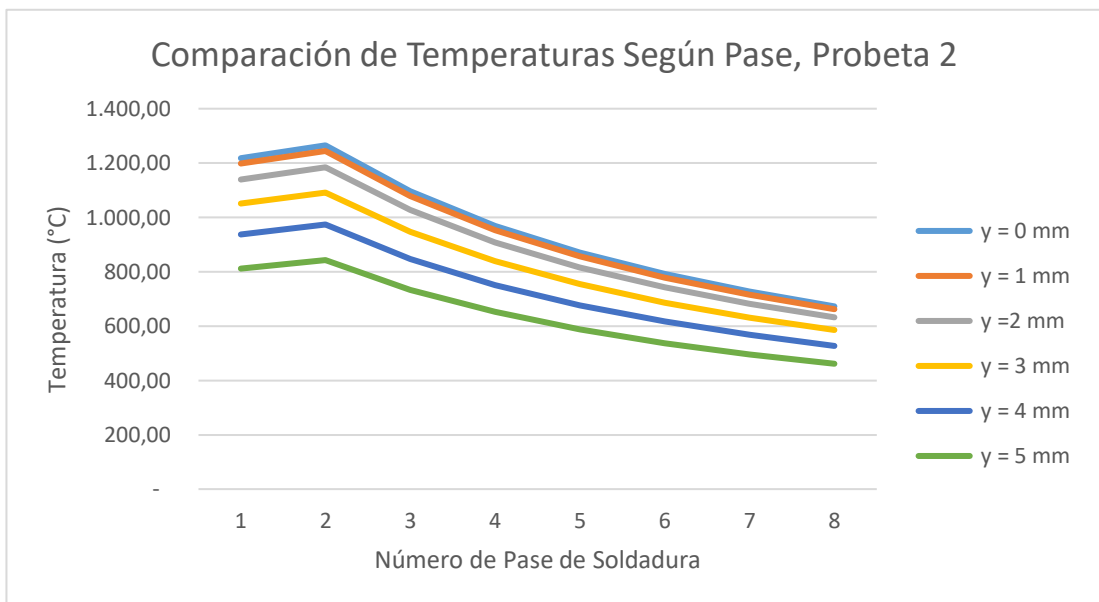


Figura 3-21: Distribución de Temperaturas por Pase, Probeta 2
Fuente: Autor

PROBETA 3

Tabla 3-22: Propiedades Mecánicas y Físicas Probeta 03

PROBETA #3									
CARACTERÍSTICAS DE SOLDADURA					CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL BASE				
Amperaje	160 (A)	Amperaje Interpase	160 (A)	Temperatura inicial del material base	80°C	Conductividad Térmica	31 W/mK		
Voltaje	11 (V)	Velocidad de avance	200 mm/min	Espesor	10 mm	Difusividad Térmica	8,9E-06		
Eficiencia de térmica	0,5					Conductividad volumétrica	3496000 J/m ³ K		

Fuente: Autor

En el primer pase el espesor del material base es igual a 10mm. Se estima un total de 8 pases

Tabla 3-23: Temperaturas calculas en función de la distancia al eje de soldadura. Probeta 03, Primer Pase

Curva 1, y = 1mm

x (mm)	60,0	50,0	40,0	30,0	20,0	10,0	8,0	7,0	6,0	5,0	4,0	3,0	2,0	1,0
T (°C)	81,2	83,4	89,6	108,4	169,2	402,7	515,5	591,4	686,8	810,2	976,8	1.217,6	1.610,6	2.457,9

Curva 2, y = 1 mm

x (mm)	60,0	50,0	40,0	30,0	20,0	10,0	8,0	7,0	6,0	5,0	4,0	3,0	2,0	1,0
T (°C)	81,2	83,4	89,6	108,4	168,7	399,7	510,4	584,6	677,4	796,6	956,0	1.182,5	1.540,3	2.244,6

Curva 3, y = 2 mm

x (mm)	60,0	50,0	40,0	30,0	20,0	10,0	8,0	7,0	6,0	5,0	4,0	3,0	2,0	1,0
T(°C)	83,3	89,5	108,1	167,5	390,8	495,5	564,7	649,9	757,3	896,4	1.083,6	1.348,3	1.712,8	1.741,9

Curva 4, y = 3 mm

x (mm)	60,0	50,0	40,0	30,0	20,0	10,0	8,0	7,0	6,0	5,0	4,0	3,0	2,0	1,0
T(°C)	83,3	89,4	107,7	165,5	376,6	471,8	533,2	607,0	696,6	805,9	938,1	1.082,8	1.100,6	729,3

Curva 5, y = 4 mm

x (mm)	60,0	50,0	40,0	30,0	20,0	10,0	8,0	7,0	6,0	5,0	4,0	3,0	2,0	1,0
T(°C)	83,3	89,3	107,1	162,7	357,7	440,8	492,5	552,3	620,6	695,8	769,2	801,7	608,6	254,2

Curva 6, y = 5 mm

x (mm)	60,0	50,0	40,0	30,0	20,0	10,0	8,0	7,0	6,0	5,0	4,0	3,0	2,0	1,0
T(°C)	83,2	89,1	106,3	159,3	335,2	404,6	445,6	490,2	536,4	578,5	599,9	552,8	306,9	112,1

Fuente: Autor

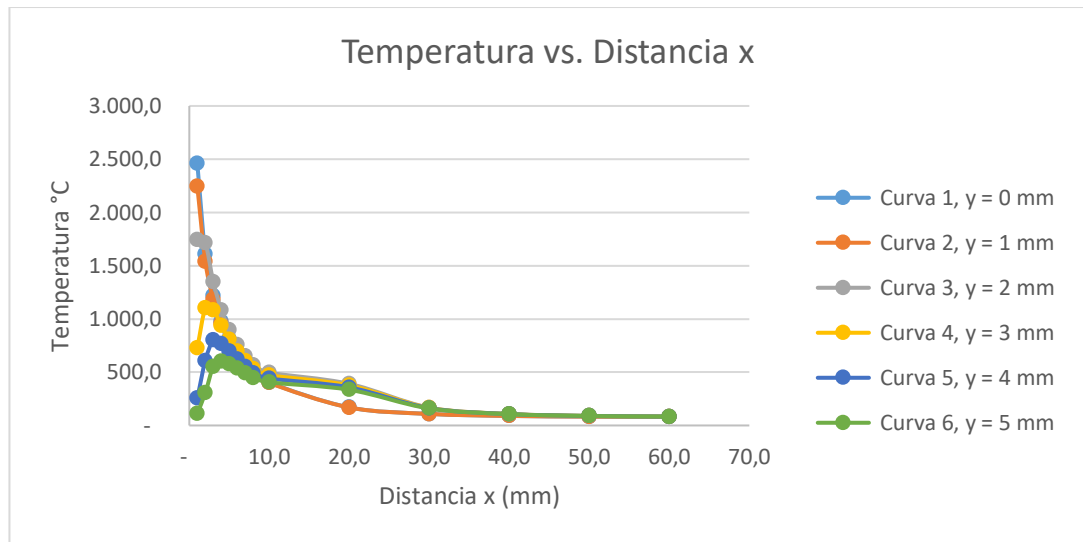


Figura 3-22: Gráfica Temperatura vs. Distancia x, Probeta 03

Fuente: Autor

En la Figura 3-22: Gráfica Temperatura vs. Distancia x, Probeta 0 se observa que la curva 01 tiene picos más altos de temperatura, Se observa temperaturas mayores que las obtenidas con en la probeta 01, debido al mayor amperaje en la soldadura interpase, habiendo una diferencia notable con la curva 5 y 6, cuyas temperaturas en la ZAT son inferiores.

Temperaturas Obtenidas en Probeta #3, por Pases

A posteriori se observan los resultados de la temperatura, producto de la soldadura GTAW, para la probeta #3, se observarán y compararán las diferentes temperaturas dependiendo del número de pase.

Tabla 3-24: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 03, y = 0mm

# de pase	x (mm)	60	50	40	30	20	10	8	7	6	5	4	3	2	1
1	T(°C)	81,20	83,36	89,62	108,45	169,17	402,74	515,45	591,39	686,79	810,21	976,84	1.217,62	1.610,59	2.457,87
2		81,00	82,80	88,02	103,70	154,31	348,95	442,88	506,16	585,66	688,50	827,37	1.028,02	1.355,49	2.061,56
3		80,86	82,40	86,87	100,32	143,69	310,53	391,04	445,28	513,42	601,58	720,60	892,59	1.173,28	1.778,48
4		80,75	82,10	86,02	97,78	135,73	281,72	352,16	399,62	459,25	536,38	640,52	791,01	1.036,62	1.566,17
5		80,67	81,87	85,35	95,80	129,54	259,30	321,92	364,11	417,11	485,67	578,24	712,01	930,33	1.401,04
6		80,60	81,68	84,81	94,22	124,58	241,37	297,73	335,70	383,40	445,10	528,42	648,81	845,29	1.268,93
7		83,22	87,14	96,16	117,76	173,59	347,82	424,77	475,49	538,37	618,79	726,38	880,88	1.132,50	1.677,16
8		80,55	81,53	84,37	92,93	120,53	226,70	277,93	312,45	355,81	411,91	487,65	597,10	775,72	1.160,85

Fuente: Autor

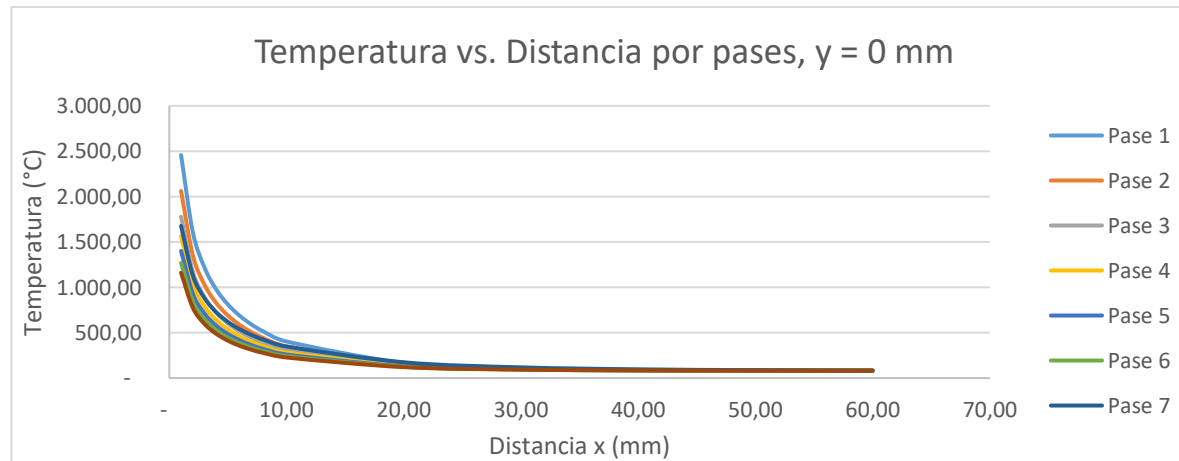


Figura 3-23: Temperatura vs. Distancia por pases, y = 0 mm, Probeta 3; Fuente: Autor

Tabla 3-25: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 03, y = 1mm

# de pase	x (mm)	60	50	40	30	20	10	8	7	6	5	4	3	2	1
1	T(°C)	81,20	83,36	89,60	108,36	168,75	399,73	510,37	584,57	677,36	796,61	956,01	1.182,54	1.540,33	2.244,58
2		81,00	82,80	88,00	103,63	153,96	346,44	438,64	500,48	577,80	677,17	810,01	998,78	1.296,94	1.883,81
3		80,86	82,40	86,86	100,25	143,39	308,38	387,41	440,41	506,69	591,86	705,72	867,53	1.123,09	1.626,13
4		80,75	82,10	86,00	97,72	135,47	279,83	348,98	395,36	453,35	527,88	627,51	769,09	992,71	1.432,86
5		80,67	81,87	85,33	95,75	129,30	257,63	319,09	360,32	411,87	478,12	566,67	692,52	891,29	1.282,54
6		80,60	81,68	84,80	94,18	124,37	239,86	295,18	332,29	378,68	438,30	518,01	631,27	810,16	1.162,29
7		83,22	87,13	96,13	117,68	173,26	345,94	421,74	471,53	533,02	611,25	715,09	862,28	1.096,05	1.568,46
8		80,54	81,53	84,36	92,89	120,34	225,33	275,62	309,35	351,53	405,73	478,19	581,15	743,79	1.063,90

Fuente: Autor

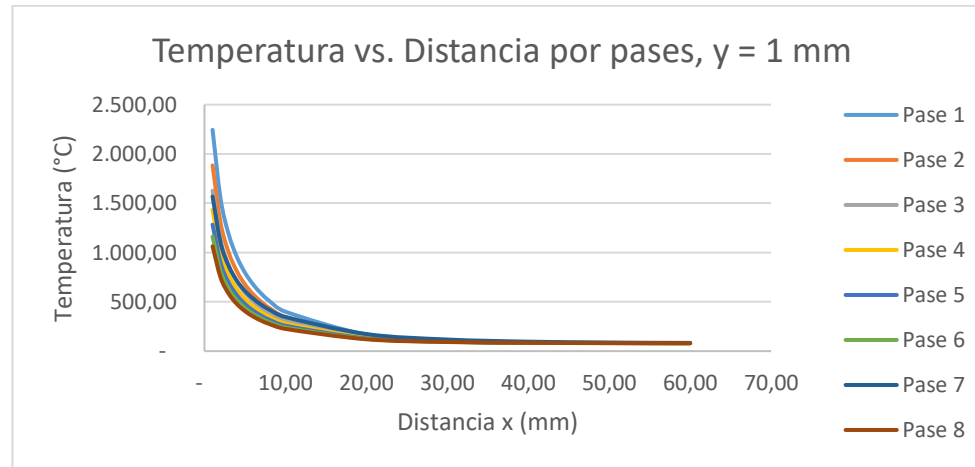


Figura 3-24: Temperatura vs. Distancia por pases, y = 1 mm, Probeta 3; Fuente: Autor

Tabla 3-26: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 03, y = 2mm

# de pase	x (mm)	60	50	40	30	20	10	8	7	6	5	4	3	2	1
1	T(°C)	83,34	89,53	108,09	167,51	390,84	495,47	564,65	649,94	757,32	896,39	1.083,64	1.348,32	1.712,79	1.741,86
2		82,78	87,95	103,41	152,92	339,03	426,22	483,88	554,95	644,43	760,33	916,37	1.136,93	1.440,66	1.464,88
3		82,38	86,81	100,07	142,50	302,03	376,76	426,18	487,10	563,80	663,14	796,89	985,94	1.246,28	1.267,04
4		82,09	85,96	97,56	134,69	274,27	339,67	382,91	436,21	503,32	590,25	707,28	872,70	1.100,49	1.118,66
5		81,85	85,30	95,61	128,61	252,69	310,81	349,25	396,63	456,29	533,55	637,58	784,62	987,11	1.003,26
6		81,67	84,77	94,05	123,75	235,42	287,73	322,33	364,97	418,66	488,20	581,82	714,16	896,39	910,93
7		87,10	96,05	117,41	172,28	340,38	412,83	459,88	517,33	589,25	682,39	809,04	994,11	1.284,77	1.411,32
8		81,52	84,33	92,77	119,78	221,29	268,85	300,30	339,06	387,87	451,09	536,20	656,51	822,18	835,39

Fuente: Autor

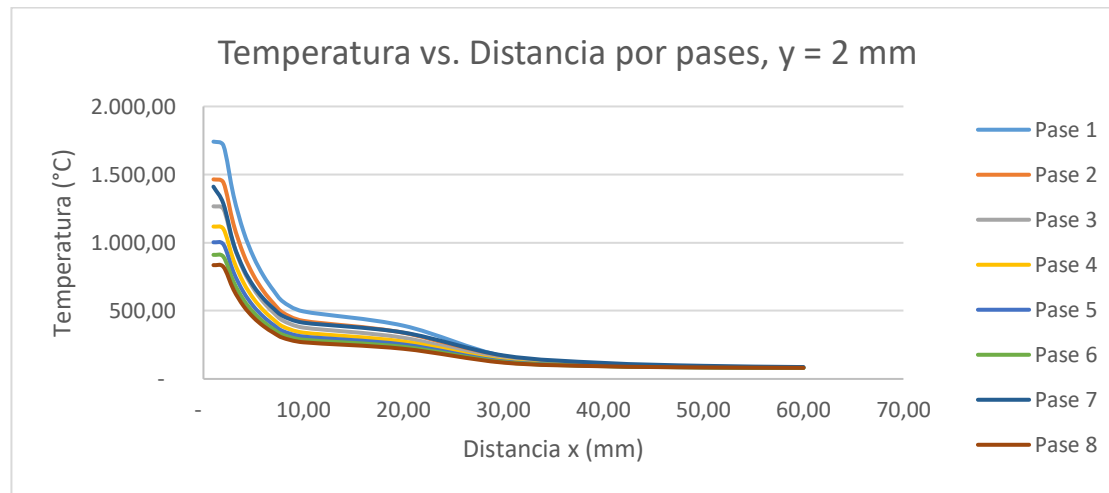


Figura 3-25: Temperatura vs. Distancia por pases, y = 2 mm, Probeta 3; Fuente: Autor

Tabla 3-27: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 03, y = 3mm

# de pase	x (mm)	60	50	40	30	20	10	8	7	6	5	4	3	2	1
1	T(°C)	83,31	89,42	107,65	165,47	376,57	471,77	533,19	607,01	696,57	805,91	938,13	1.082,75	1.100,61	729,31
2		82,76	87,85	103,05	151,23	327,14	406,47	457,66	519,17	593,80	684,92	795,11	915,63	930,51	621,09
3		82,36	86,73	99,75	141,05	291,83	359,83	403,70	456,44	520,40	598,51	692,95	796,25	809,00	543,79
4		82,07	85,89	97,28	133,42	265,36	324,85	363,24	409,38	465,35	533,69	616,33	706,72	717,88	485,82
5		81,84	85,24	95,36	127,49	244,76	297,65	331,77	372,78	422,54	483,28	556,74	637,08	647,00	440,73
6		81,65	84,71	93,83	122,74	228,28	275,88	306,59	343,50	388,28	442,95	509,07	581,38	590,30	404,65
7		87,05	95,91	116,97	170,67	331,36	398,49	441,22	492,38	554,59	631,58	728,24	846,43	926,94	737,92
8		81,50	84,28	92,57	118,85	214,80	258,08	285,99	319,55	360,26	409,96	470,06	535,80	543,91	375,14

Fuente: Autor

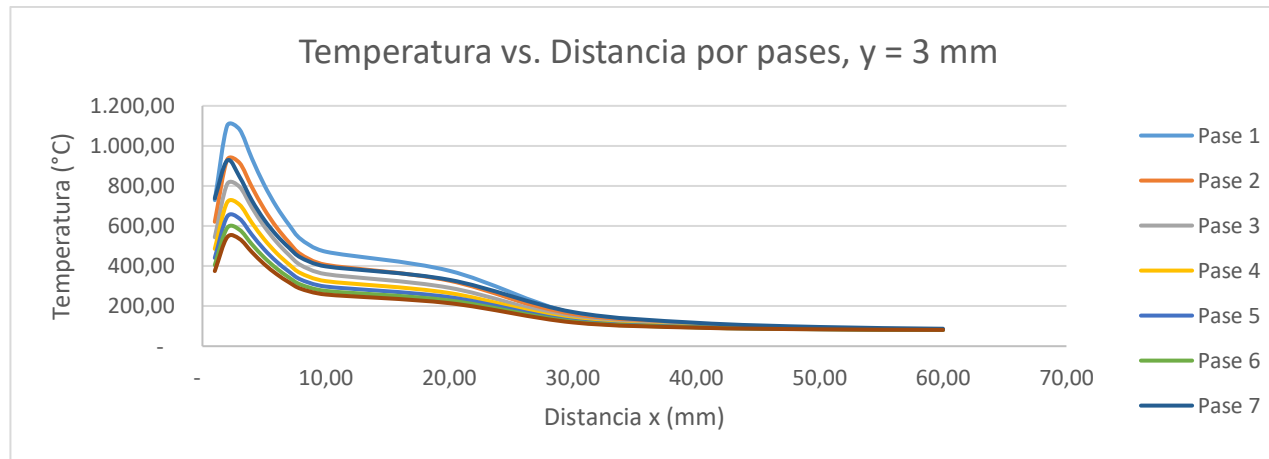


Figura 3-26: Temperatura vs. Distancia por pases, y = 3 mm, Probeta 3; Fuente: Autor

Tabla 3-28: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 03, y = 4mm

# de pase	x (mm)	60	50	40	30	20	10	8	7	6	5	4	3	2	1
1	T(°C)	83,26	89,27	107,05	162,71	357,69	440,84	492,54	552,28	620,55	695,82	769,16	801,68	608,64	254,20
2		82,72	87,72	102,55	148,92	311,41	380,70	423,78	473,57	530,46	593,19	654,30	681,40	520,53	225,17
3		82,33	86,62	99,32	139,08	278,35	337,74	374,67	417,34	466,11	519,87	572,26	595,48	457,60	204,43
4		82,04	85,79	96,91	131,69	253,55	305,52	337,84	375,18	417,85	464,89	510,73	531,05	410,40	188,88
5		81,81	85,15	95,03	125,95	234,27	280,47	309,19	342,38	380,31	422,12	462,87	480,93	373,69	176,78
6		81,63	84,63	93,53	121,35	218,84	260,42	286,27	316,14	350,28	387,91	424,58	440,84	344,32	167,10
7		86,98	95,71	116,37	168,46	319,26	379,44	416,64	459,83	510,00	567,58	629,93	678,87	597,10	325,26
8		81,48	84,21	92,30	117,59	206,22	244,02	267,52	294,67	325,71	359,92	393,26	408,04	320,29	159,18

Fuente: Autor

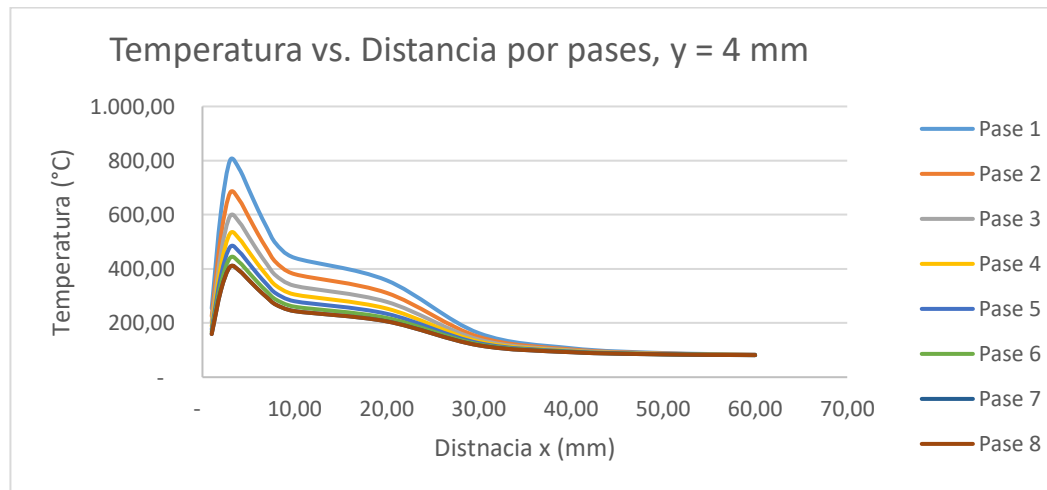


Figura 3-27: Temperatura vs. Distancia por pases, y = 4 mm, Probeta 3; Fuente: Autor

Tabla 3-29: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 03, y = 5mm

# de pase	x (mm)	60	50	40	30	20	10	8	7	6	5	4	3	2	1
1	T(°C)	83,21	89,08	106,30	159,28	335,17	404,64	445,58	490,19	536,43	578,45	599,85	552,80	306,90	112,09
2		82,67	87,56	101,92	146,07	292,64	350,53	384,65	421,82	460,36	495,38	513,21	474,00	269,08	106,74
3		82,29	86,48	98,79	136,63	262,26	311,88	341,13	372,99	406,02	436,04	451,32	417,72	242,07	102,92
4		82,01	85,67	96,44	129,55	239,48	282,90	308,49	336,37	365,27	391,53	404,91	375,50	221,81	100,06
5		81,78	85,04	94,61	124,05	221,76	260,35	283,10	307,88	333,57	356,92	368,81	342,67	206,05	97,83
6		81,60	84,54	93,15	119,64	207,58	242,32	262,79	285,09	308,21	329,23	339,93	316,40	193,45	96,05
7		86,90	95,47	115,61	165,70	304,56	356,61	387,48	421,72	458,76	496,07	525,12	516,10	354,21	148,97
8		81,46	84,13	91,96	116,04	195,98	227,56	246,17	266,45	287,47	306,57	316,30	294,91	183,14	94,59

Fuente: Autor

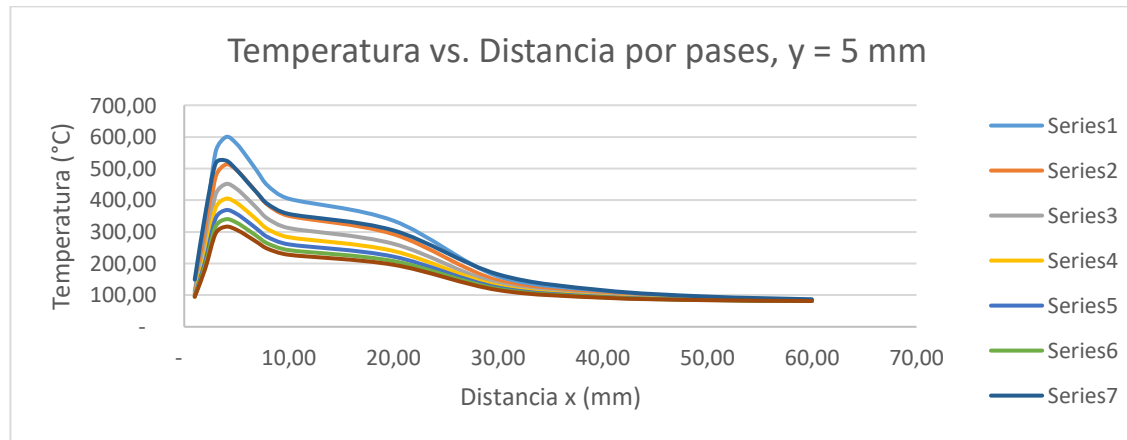


Figura 3-28: Temperatura vs. Distancia por pases, y = 5 mm, Probeta 3; Fuente: Autor

Según la información calculada se puede observar que los picos de temperatura se producen en el primer pase, que es recurrente con la información recopilada, ya que el primer pase es crítico para el material base, y se deben controlar parámetros de soldadura para no permitir que la temperatura exceda. En este procedimiento la temperatura inicial como se indicó es de 80°C , la cual se controla durante todo el proceso, y se convierte en temperatura interpase.

Después de cada pase de soldadura se debe esperar el tiempo necesario para que la probeta recupere la temperatura de 80°C , una vez ello se procede con el siguiente pase, hasta finalizar el proceso de soldadura por revenido.

La probeta 3 tiene una velocidad de avance de soldadura igual a 200 mm/min , por lo cual las temperaturas disminuyen, debido a que no existe un alto tiempo en el cual la fuente de soldadura se encuentre con el material base.

Cuando $y = 0$, la temperatura pico máxima es 2457.87°C , cuando el punto se localiza a 1 mm de la fuente de soldadura; cuando $y = 1$ la temperatura máxima es 2245.58°C , cuando $y = 2$ se obtiene una temperatura máxima de 1741.86°C , cuando $y = 3\text{ mm}$ la temperatura máxima es 110.61°C , cuando $y = 4\text{ mm}$ $T = 801.68^{\circ}\text{C}$, y cuando $y = 5\text{ mm}$ la máxima temperatura encontrada es de 552.80°C .

Adicionalmente se puede observar en los cálculos que a una distancia $x = 3\text{ mm}$ se obtienen los puntos máximos de temperatura.

La Figura 3-29 y Figura 3-20 representa el análisis comparativo de temperatura según el número de pase correspondiente para $x = 2\text{ mm}$, pudiendo observar de manera más claro que a medida que la fuente se distancia del material base la temperatura disminuye considerablemente, obteniéndose una reducción del 2% desde $y = 0\text{ mm}$ a $y = 1\text{ mm}$; 13% desde $y = 1\text{ mm}$ a $y = 2\text{ mm}$; 13% desde $y = 2\text{ mm}$ a $y = 3\text{ mm}$; 18% desde $y = 3\text{ mm}$ a $y = 4\text{ mm}$, 21% desde $y = 4\text{ mm}$ a $y = 5\text{ mm}$.

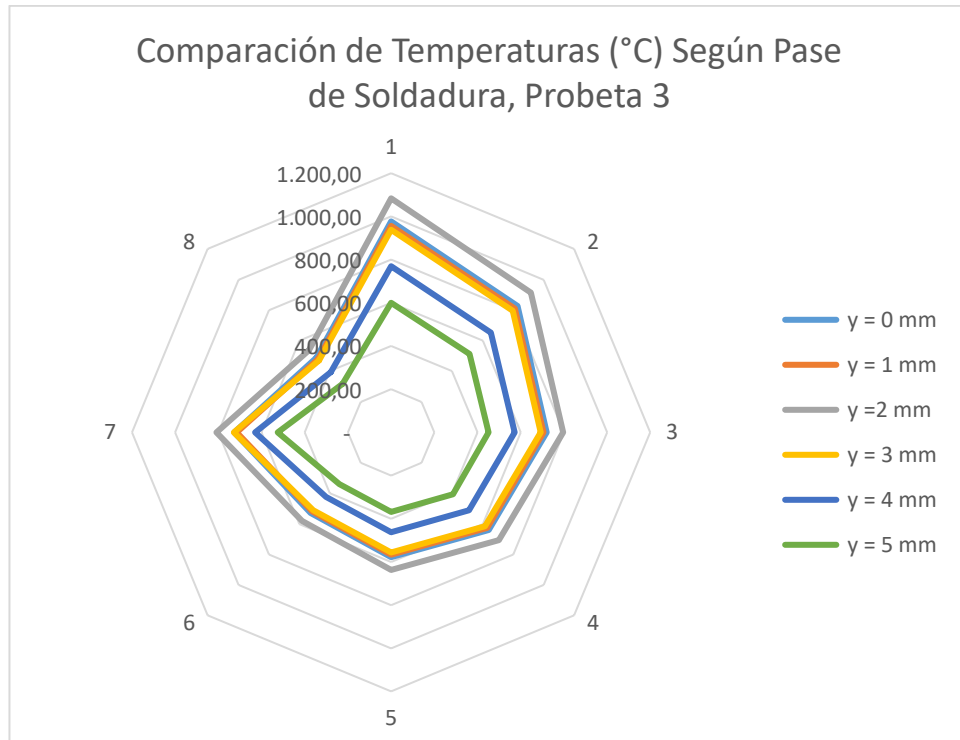


Figura 3-29: Distribución de Temperaturas por Pase, Probeta 3
Fuente: Autor

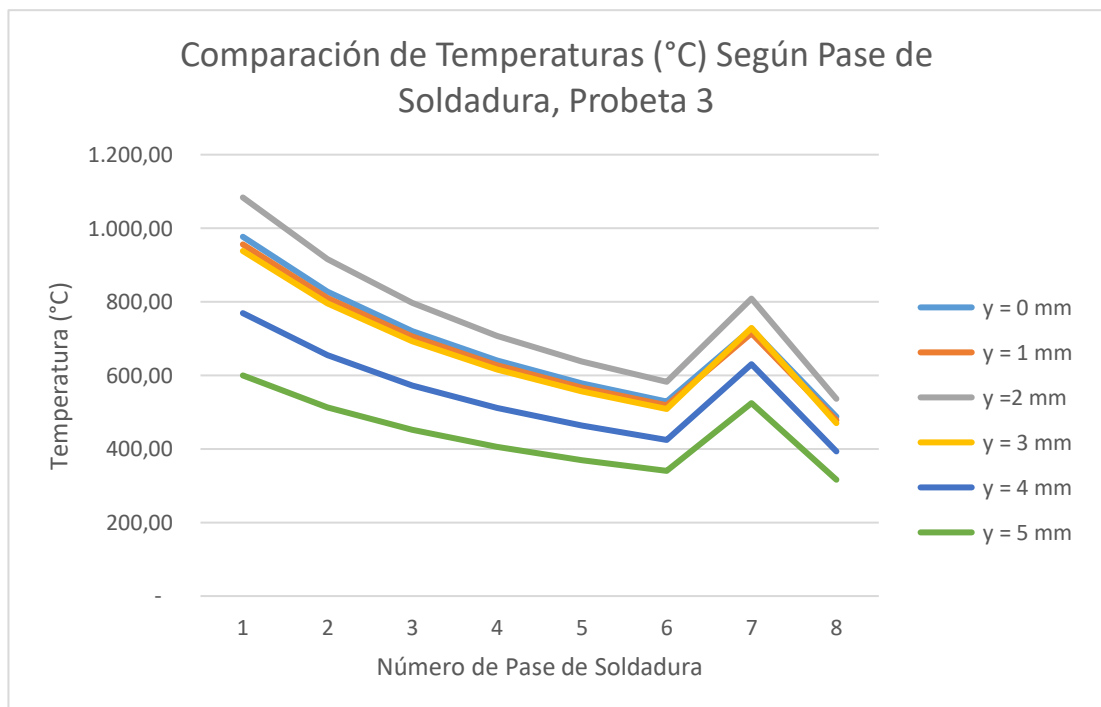


Figura 3-30: Distribución de Temperaturas por Pase, Probeta 3
Fuente: Autor

PROBETA 4

Tabla 3-30: Propiedades Mecánicas y Físicas Probeta 04

PROBETA #4									
CARACTERÍSTICAS DE SOLDADURA					CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL BASE				
Amperaje	160 (A)	Amperaje Interpase	200 (A)	Temperatura inicial del material base	80°C	Conductividad Térmica	31 W/mK		
Voltaje	11 (V)	Velocidad de avance	200 mm/min	Espesor	10 mm	Difusividad Térmica	8,9E-06		
Eficiencia de térmica	0,5					Conductividad volumétrica	3496000 J/m ³ K		

Fuente: Autor

En el primer pase el espesor del material base es igual a 10mm. Se estima un total de 8 pases

Tabla 3-31: Temperaturas calculas en función de la distancia al eje de soldadura. Probeta 04, Primer Pase

Curva 1, y = 0 mm

x (mm)	60,0	50,0	40,0	30,0	20,0	10,0	8,0	7,0	6,0	5,0	4,0	3,0	2,0	1,0
T (°C)	81,2	83,4	89,6	108,4	169,2	402,7	515,5	591,4	686,8	810,2	976,8	1.217,6	1.610,6	2.457,9

Curva 2, y = 1 mm

x (mm)	60,0	50,0	40,0	30,0	20,0	10,0	8,0	7,0	6,0	5,0	4,0	3,0	2,0	1,0
T (°C)	81,2	83,4	89,6	108,4	168,7	399,7	510,4	584,6	677,4	796,6	956,0	1.182,5	1.540,3	2.244,6

Curva 3, y = 2 mm

x (mm)	60,0	50,0	40,0	30,0	20,0	10,0	8,0	7,0	6,0	5,0	4,0	3,0	2,0	1,0
T (°C)	83,3	89,5	108,1	167,5	390,8	495,5	564,7	649,9	757,3	896,4	1.083,6	1.348,3	1.712,8	1.741,9

Curva 4, y = 3 mm

x (mm)	60,0	50,0	40,0	30,0	20,0	10,0	8,0	7,0	6,0	5,0	4,0	3,0	2,0	1,0
T (°C)	83,3	89,4	107,7	165,5	376,6	471,8	533,2	607,0	696,6	805,9	938,1	1.082,8	1.100,6	729,3

Curva 5, y = 4 mm

x (mm)	60,0	50,0	40,0	30,0	20,0	10,0	8,0	7,0	6,0	5,0	4,0	3,0	2,0	1,0
T (°C)	83,3	89,3	107,1	162,7	357,7	440,8	492,5	552,3	620,6	695,8	769,2	801,7	608,6	254,2

Curva 6, y = 5 mm

x (mm)	60,0	50,0	40,0	30,0	20,0	10,0	8,0	7,0	6,0	5,0	4,0	3,0	2,0	1,0
T (°C)	83,2	89,1	106,3	159,3	335,2	404,6	445,6	490,2	536,4	578,5	599,9	552,8	306,9	112,1

Fuente: Autor

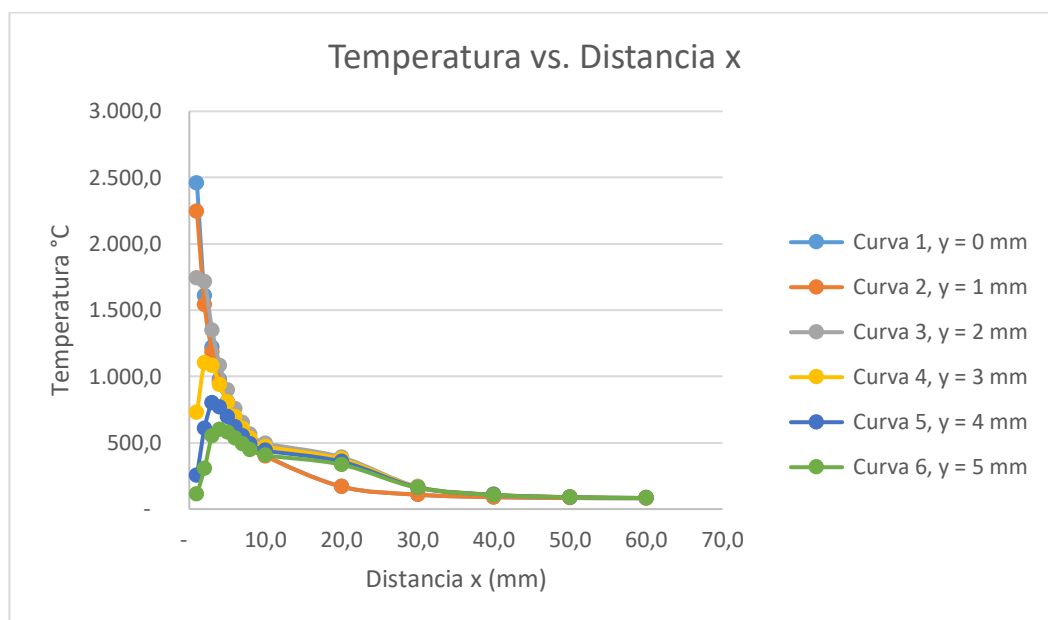


Figura 3-31: Gráfica Temperatura vs. Distancia x, Probeta 04

Fuente: Autor

En la Figura 3-31, se observa que la curva 01 tiene picos más altos de temperatura, Se observa temperaturas mayores que las obtenidas con en la probeta 01, debido al mayor amperaje en la soldadura interpase, así mismos las curvas pertenecientes a distancia y = 4 mm, y = 5mm son las que tienen menor ciclo térmico.

Temperaturas Obtenidas en Probeta #4, por Pases

A posteriori se observan los resultados de la temperatura, producto de la soldadura GTAW, para la probeta #4, se observarán y compararán las diferentes temperaturas dependiendo del número de pase.

Tabla 3-32: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 04, y = 0mm

# de pase	x (mm)	60	50	40	30	20	10	8	7	6	5	4	3	2	1
1	T(°C)	81,20	83,36	89,62	108,45	169,17	402,74	515,45	591,39	686,79	810,21	976,84	1.217,62	1.610,59	2.457,87
2		81,25	83,50	90,03	109,63	172,88	416,19	533,60	612,70	712,08	840,63	1.014,21	1.265,02	1.674,36	2.556,94
3		81,07	83,00	88,59	105,40	159,61	368,16	468,80	536,60	621,78	731,97	880,75	1.095,73	1.446,60	2.203,10
4		80,94	82,63	87,52	102,22	149,66	332,14	420,20	479,52	554,06	650,47	780,66	968,77	1.275,77	1.937,71
5		80,83	82,34	86,68	99,75	141,92	304,13	382,40	435,13	501,38	587,09	702,80	870,02	1.142,91	1.731,30
6		80,75	82,10	86,02	97,78	135,73	281,72	352,16	399,62	459,25	536,38	640,52	791,01	1.036,62	1.566,17
7		80,68	81,91	85,47	96,16	130,66	263,38	327,42	370,56	424,77	494,89	589,57	726,38	949,65	1.431,06
8		80,62	81,75	85,01	94,82	126,44	248,10	306,80	346,35	396,04	460,32	547,10	672,51	877,18	1.318,47

Fuente: Autor

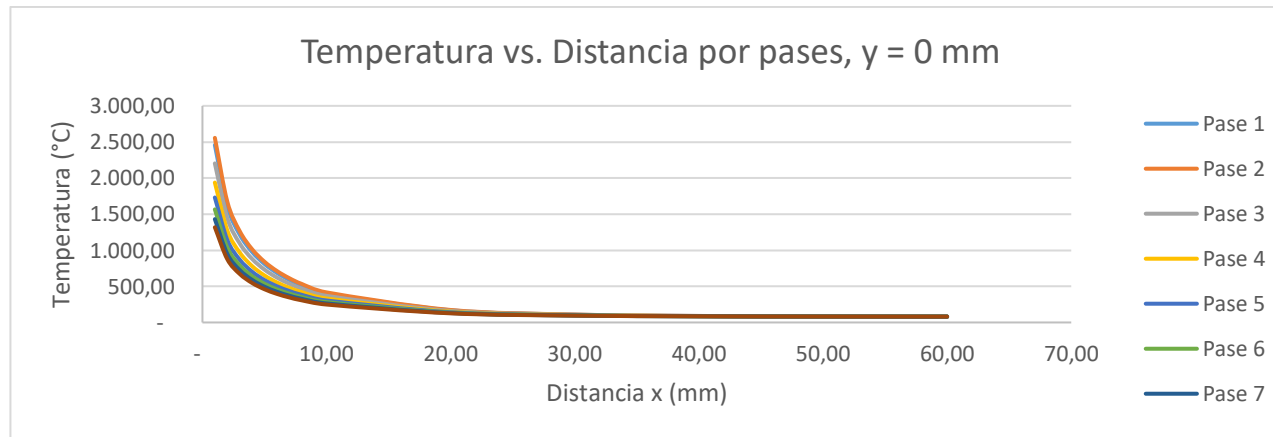


Figura 3-32: Temperatura vs. Distancia por pases, y = 0 mm, Probeta 4; Fuente: Autor

Tabla 3-33: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 04, y = 1mm

# de pase	x (mm)	60	50	40	30	20	10	8	7	6	5	4	3	2	1
1	T(°C)	81,20	83,36	89,60	108,36	168,75	399,73	510,37	584,57	677,36	796,61	956,01	1.182,54	1.540,33	2.244,58
2		81,25	83,50	90,00	109,54	172,45	413,05	528,30	605,59	702,25	826,47	992,51	1.228,48	1.601,18	2.334,77
3		81,07	83,00	88,57	105,32	159,24	365,47	464,26	530,51	613,36	719,83	862,16	1.064,41	1.383,87	2.012,66
4		80,94	82,62	87,50	102,15	149,33	329,79	416,23	474,20	546,69	639,85	764,39	941,36	1.220,88	1.771,08
5		80,83	82,33	86,67	99,69	141,63	302,03	378,87	430,40	494,83	577,65	688,34	845,65	1.094,12	1.583,18
6		80,75	82,10	86,00	97,72	135,47	279,83	348,98	395,36	453,35	527,88	627,51	769,09	992,71	1.432,86
7		80,68	81,91	85,46	96,11	130,43	261,66	324,53	366,69	419,41	487,16	577,74	706,44	909,73	1.309,87
8		80,62	81,75	85,00	94,77	126,22	246,52	304,15	342,80	391,13	453,23	536,26	654,24	840,59	1.207,38

Fuente: Autor

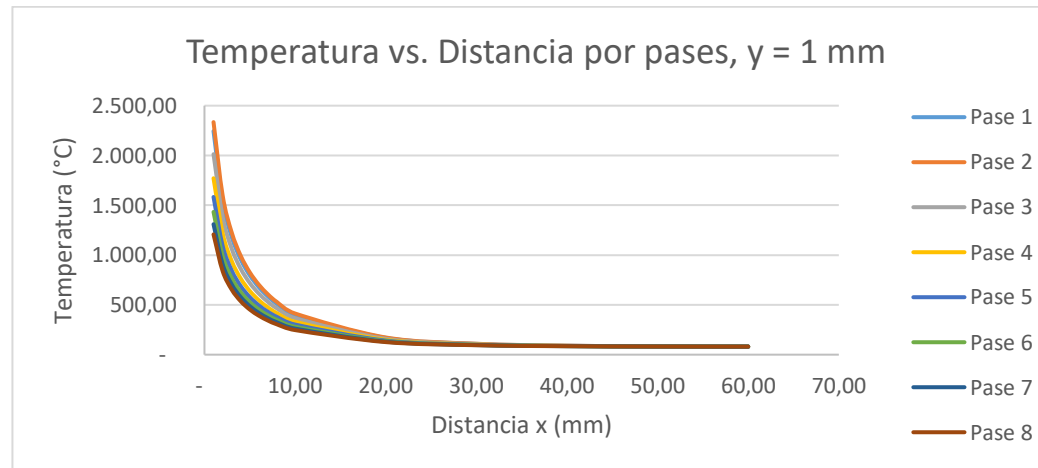


Figura 3-33: Temperatura vs. Distancia por pases, y = 1 mm, Probeta 4; Fuente: Autor

Tabla 3-34: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 04, y = 2mm

# de pase	x (mm)	60	50	40	30	20	10	8	7	6	5	4	3	2	1
1	T(°C)	83,34	89,53	108,09	167,51	390,84	495,47	564,65	649,94	757,32	896,39	1.083,64	1.348,32	1.712,79	1.741,86
2		83,48	89,93	109,26	171,15	403,79	512,78	584,85	673,69	785,54	930,41	1.125,46	1.401,17	1.780,82	1.811,11
3		82,98	88,51	105,08	158,13	357,53	450,95	512,72	588,88	684,75	808,92	976,11	1.212,43	1.537,85	1.563,81
4		82,61	87,45	101,95	148,36	322,84	404,58	458,63	525,27	609,16	717,81	864,10	1.070,88	1.355,62	1.378,33
5		82,32	86,62	99,51	140,77	295,86	368,52	416,56	475,79	550,36	646,94	776,97	960,78	1.213,88	1.234,07
6		82,09	85,96	97,56	134,69	274,27	339,67	382,91	436,21	503,32	590,25	707,28	872,70	1.100,49	1.118,66
7		81,90	85,42	95,96	129,72	256,61	316,06	355,37	403,83	464,84	543,86	650,25	800,64	1.007,72	1.024,24
8		81,74	84,97	94,63	125,58	241,89	296,39	332,42	376,84	432,77	505,21	602,73	740,58	930,41	945,55

Fuente: Autor

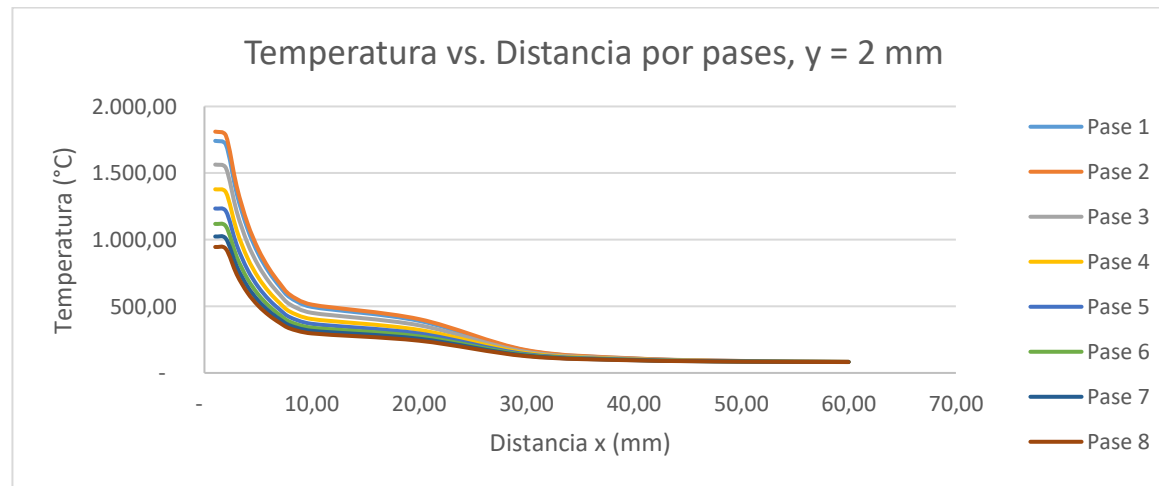


Figura 3-34: Temperatura vs. Distancia por pases, y = 2 mm, Probeta 4; Fuente: Autor

Tabla 3-35: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 04, y = 3mm

# de pase	x (mm)	60	50	40	30	20	10	8	7	6	5	4	3	2	1
1	T(°C)	108,00	145,07	239,58	522,40	640,54	715,76	805,80	915,28	1.050,79	1.220,90	1.428,92	1.570,61	1.237,94	548,66
2		109,16	147,78	246,22	540,83	663,89	742,25	836,04	950,09	1.091,24	1.268,43	1.485,13	1.632,72	1.286,19	568,19
3		105,00	138,10	222,48	475,00	580,48	647,64	728,03	825,79	946,77	1.098,66	1.284,39	1.410,90	1.113,88	498,45
4		101,87	130,84	204,67	425,62	517,92	576,68	647,03	732,56	838,43	971,32	1.133,84	1.244,54	984,64	446,14
5		99,44	125,19	190,82	387,22	469,26	521,50	584,03	660,06	754,16	872,29	1.016,75	1.115,14	884,13	405,46
6		97,50	120,67	179,73	356,50	430,33	477,35	533,62	602,05	686,74	793,06	923,08	1.011,63	803,71	372,91
7		95,91	116,97	170,67	331,36	398,49	441,22	492,38	554,59	631,58	728,24	846,43	926,94	737,92	346,29
8		94,58	113,89	163,11	310,42	371,95	411,12	458,02	515,04	585,62	674,22	782,56	856,36	683,10	324,10

Fuente: Autor

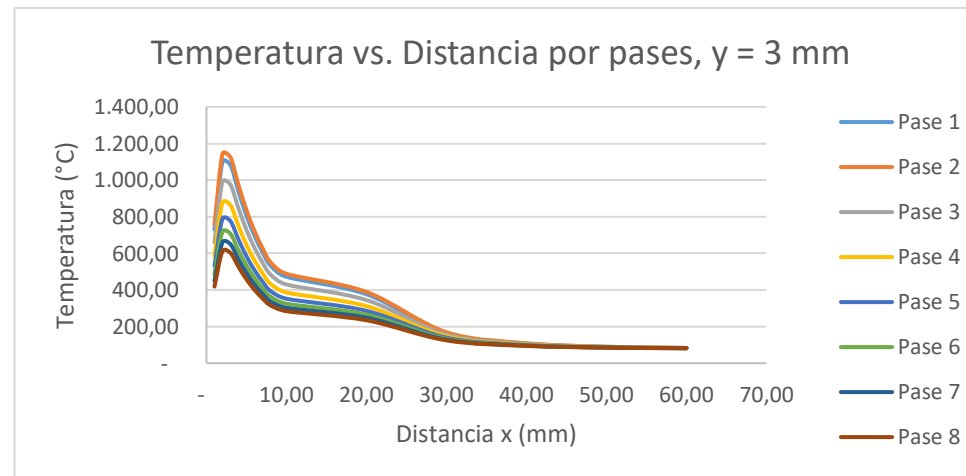


Figura 3-35: Temperatura vs. Distancia por pases, y = 3 mm, Probeta 4; Fuente: Autor

Tabla 3-36: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 04, y = 4mm

# de pase	x (mm)	60	50	40	30	20	10	8	7	6	5	4	3	2	1
1	T(°C)	83,26	89,27	107,05	162,71	357,69	440,84	492,54	552,28	620,55	695,82	769,16	801,68	608,64	254,20
2		83,40	89,66	108,18	166,15	369,26	455,87	509,73	571,96	643,08	721,48	797,88	831,75	630,66	261,46
3		82,91	88,28	104,16	153,85	327,93	402,18	448,34	501,68	562,64	629,84	695,32	724,36	552,00	235,54
4		82,55	87,24	101,14	144,62	296,94	361,91	402,29	448,97	502,31	561,11	618,41	643,81	493,00	216,09
5		82,27	86,44	98,79	137,44	272,84	330,58	366,48	407,97	455,38	507,66	558,59	581,17	447,11	200,97
6		82,04	85,79	96,91	131,69	253,55	305,52	337,84	375,18	417,85	464,89	510,73	531,05	410,40	188,88
7		81,85	85,27	95,37	126,99	237,78	285,02	314,40	348,34	387,13	429,90	471,57	490,04	380,36	178,98
8		81,70	84,83	94,09	123,08	224,63	267,94	294,86	325,98	361,54	400,74	438,94	455,87	355,33	170,73

Fuente: Autor

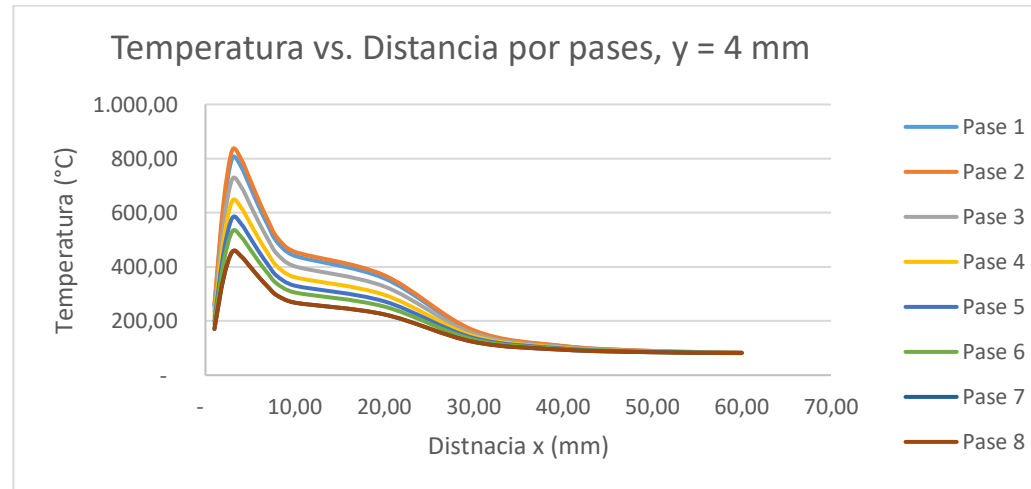


Figura 3-36: Temperatura vs. Distancia por pases, y = 4 mm, Probeta 4; Fuente: Autor

Tabla 3-37: Temperatura Soldadura GTAW, Probeta 04, y = 5mm

# de pase	x (mm)	60	50	40	30	20	10	8	7	6	5	4	3	2	1
1	T(°C)	83,21	89,08	106,30	159,28	335,17	404,64	445,58	490,19	536,43	578,45	599,85	552,80	306,90	112,09
2		83,34	89,45	107,40	162,59	345,80	418,16	460,82	507,28	555,45	599,22	621,51	572,50	316,35	113,43
3		82,87	88,10	103,48	150,79	307,83	369,85	406,41	446,24	487,53	525,05	544,15	502,14	282,59	108,65
4		82,51	87,09	100,55	141,94	279,35	333,62	365,61	400,46	436,59	469,42	486,13	449,38	257,26	105,07
5		82,23	86,30	98,27	135,06	257,20	305,44	333,88	364,85	396,96	426,15	441,01	408,33	237,57	102,29
6		82,01	85,67	96,44	129,55	239,48	282,90	308,49	336,37	365,27	391,53	404,91	375,50	221,81	100,06
7		81,82	85,16	94,94	125,05	224,98	264,45	287,72	313,06	339,33	363,21	375,37	348,64	208,92	98,23
8		81,67	84,73	93,70	121,29	212,90	249,08	270,41	293,64	317,72	339,61	350,76	326,25	198,18	96,71

Fuente: Autor

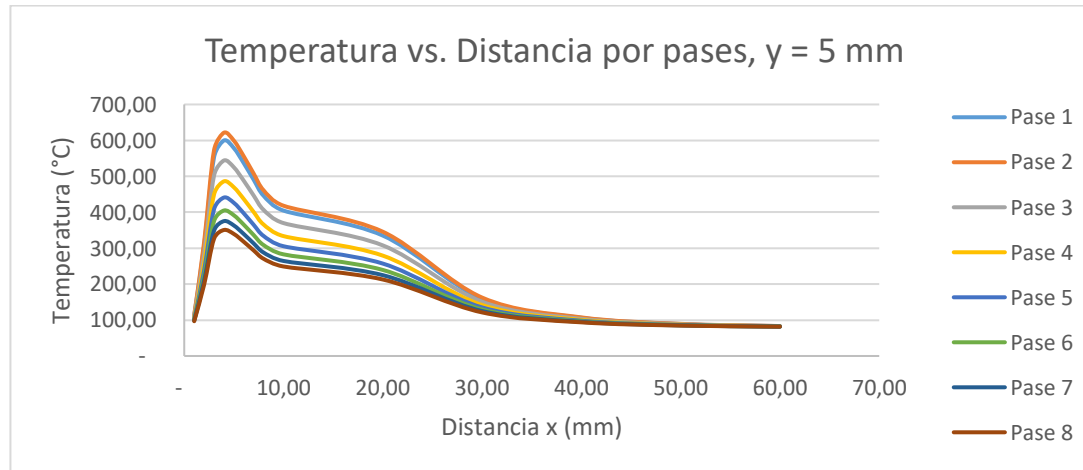


Figura 3-37: Temperatura vs. Distancia por pases, y = 5 mm, Probeta 4; Fuente: Autor

Después de cada pase de soldadura se debe esperar el tiempo necesario para que la probeta recupere la temperatura de 80°C, una vez ello se procede con el siguiente pase, hasta finalizar el proceso de soldadura por revenido.

Las temperaturas del primer pase, son iguales a las de la probeta 1, debido a que trabaja con las mismas condiciones de soldadura, de lo que se obtiene:

Cuando $y = 0$, la temperatura pico máxima es 2244.58°C, cuando el punto se localiza a 1 mm de la fuente de soldadura; cuando $y = 0$ la temperatura máxima es 1741.86°C, cuando $y = 2$ se obtiene una temperatura máxima de 110.61°C, cuando $y = 3$ mm la temperatura máxima es 810.68°C, cuando $y = 4$ mm $T = 1134.02^\circ\text{C}$, y cuando $y = 5$ mm la máxima temperatura encontrada es de 599.85°C.

Adicionalmente se puede observar en los cálculos que a una distancia $x = 3\text{mm}$ se obtienen los puntos máximos de temperatura.

La Figura 3-38 y Figura 3-39, representa el análisis comparativo de temperatura según el número de pase correspondiente para $x = 2\text{mm}$, pudiendo observar de manera más claro que a medida que la fuente se distancia del material base la temperatura disminuye considerablemente, obteniéndose una reducción del 2% desde $y = 0$ mm a $y = 1$ mm; 13% desde $y = 1$ mm a $y = 2$ mm; 13% desde $y = 2$ mm a $y = 3$ mm; 18% desde $y = 3$ mm a $y = 4$ mm, 22% desde $y = 4$ mm a $y = 5$ mm.

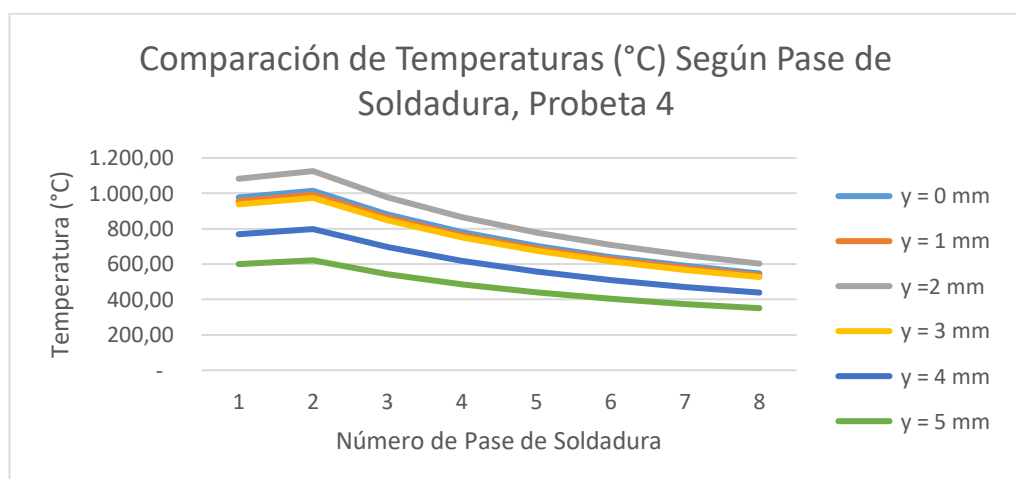


Figura 3-38: Distribución de Temperaturas por Pase, Probeta 4

Fuente: Autor

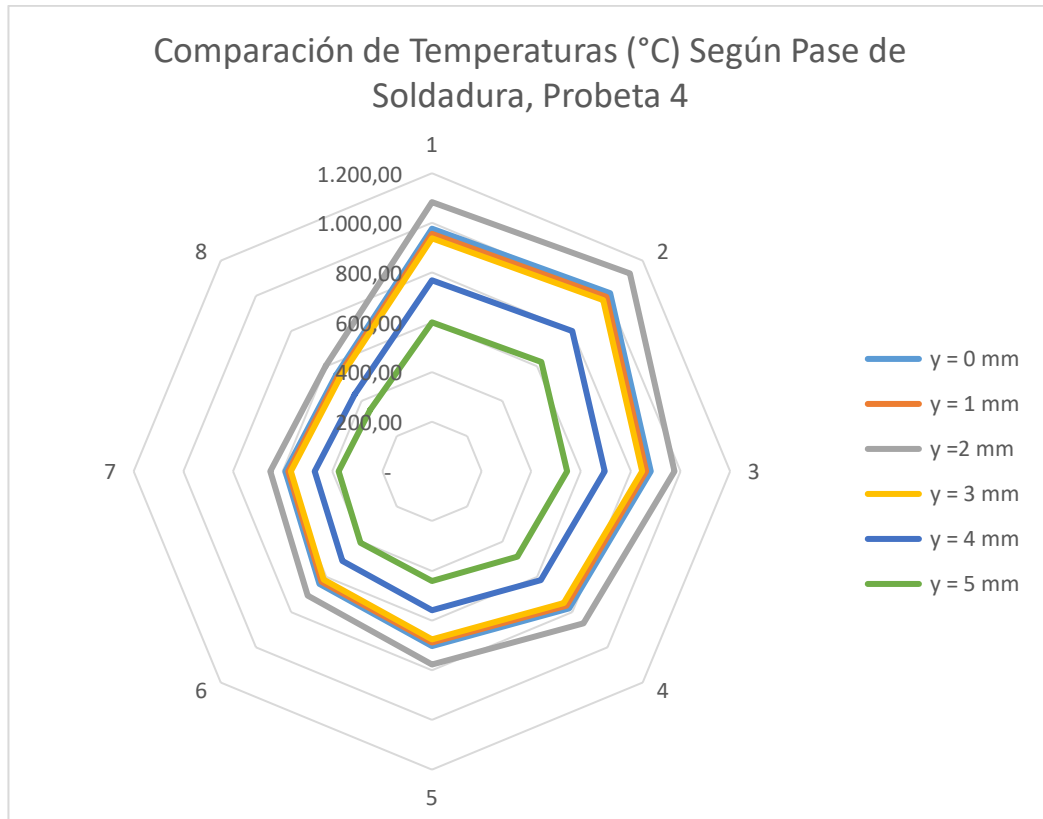


Figura 3-39: Distribución de Temperaturas por Pase, Probeta 4
Fuente: Autor

El parámetro de temperatura óptimo para conversar una buena microestructura en la ZAT es a 4 mm de la distancia y respecto a la fuente de soldadura. Adicionalmente se observa que es indispensable que el primer pase se realice a un amperaje más bajo que los pases subsecuentes, para obtener un mejor ciclo de soldadura, y con respecto a la velocidad de avance, una velocidad de avance adecuada contribuye a la disminución de temperatura y tiempo de soldadura, como se observa en los resultados de las probetas 3 y 4.

Durante el proceso de Soldadura de Pases de Revenido es sumamente importante respetar el tiempo de enfriamiento de la placa hasta que la misma recupere la temperatura de 80°C, esto garantiza la funcionalidad del proceso, caso contrario las temperaturas obtenidas podrían elevarse y afectar las propiedades del material.

3.1.1.7. Cálculo de Dureza

Los cálculos de dureza se muestra en la Tabla 3-38, las cuales también tienen la información de del $t_{8/5}$, indispensable para el cálculo.

Tabla 3-38: Dureza Calculada según $t_{8/5}$

PROBETA	No. De Pase	$t_{8/5}$ (s)	Dureza (HV)
P01	1	1,79283602	298,15
	2-n	0,6536468	293,69
P02	2	1,79283602	299,70
	2-n	0,8170585	293,69
P03	3	1,34462702	293,56
	2-n	0,4902351	286,10
P04	4	1,34462702	293,56
	2-n	0,4902351	279,25

Fuente: Autor

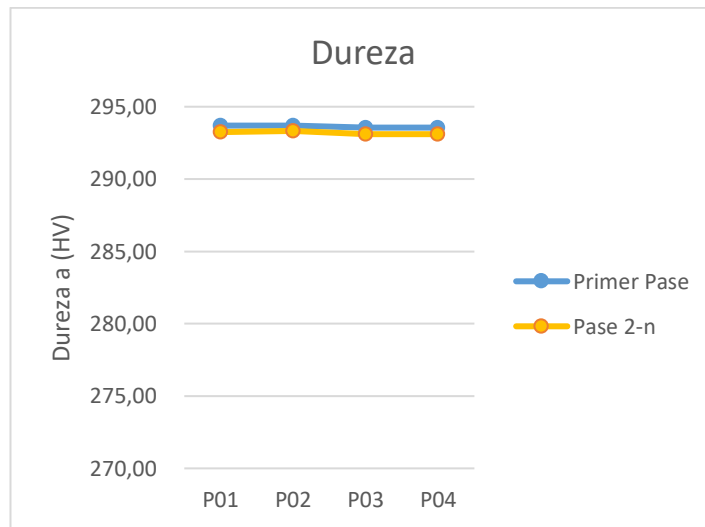


Figura 3-40: Dureza Calculada

Fuente: Autor

El tiempo $t_{8/5}$ de soldadura es proporcional a la potencia de soldadura, propiedades del material como la conductividad térmica e inversamente proporcional a la velocidad de avance, y es un factor incidente en el cálculo de la dureza. Como se puede observar en

la Figura 3-40, la probeta 04 en el pase 02 es la que tiene menor dureza, (y es lo que se desea conseguir, ya que una dureza elevada puede provocar fragilidad en la ZAT), se tiene en cuenta que la potencia es mayor, sin embargo, la velocidad de avance es también superior en un 33%, lo que demuestra que es factor más significativo al momento de obtener una dureza deseada, en el presente caso es de 260 HV.

Con los cálculos realizados se ha optimizado un modelo con los parámetros necesarios para la obtención de la dureza. Cabe destacar que los cálculos son teóricos y estarán a rigor de las disponibilidades de quipos y materiales.

El cálculo de HV requiere el cálculo de x , en el cual el parámetro $t_{8/5}$. La variable x , ingresa a la ecuación como una función inversa a la tangente, la cual obtiene sus puntos mínimos en el intervalo de -1 a 1, por lo que el $t_{8/5}$ debe estar alrededor de 10 segundos, con ello se obtienen los siguientes resultados:

Dureza Estimada: 280 HV

Velocidad de avance: 200 - 215 mm/min

Voltaje: 11 -13 V

Intensidad de corriente: 150 - 170 A

Temperatura de Pre calentamiento: 150°C

3.1.2. Diseño por Elementos Finitos

El diseño por elementos finitos se ha realizado Ansys Research, para lo cual primero se modeló el área de transversal de la probeta, en pro de obtener los resultados de la temperatura, mostrada en la Figura 3-41. El siguiente análisis por DEF (Diseño de Elementos Finitos) se ha realizado tomando como base los datos de la probeta 01, primer pase. Se considera el primer pase el más importante debido a que es que afecta a la ZAT.

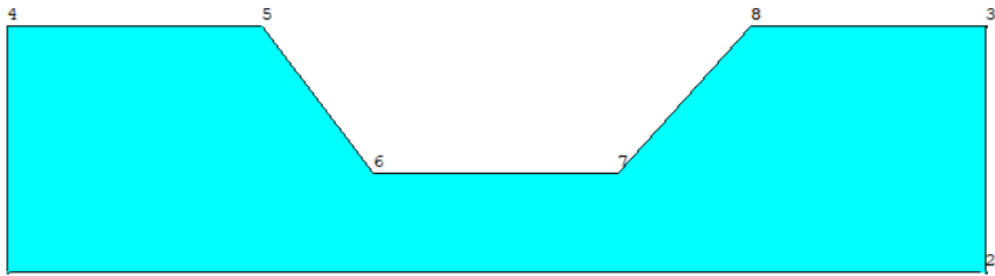


Figura 3-41: Modela de Probeta

Fuente: Autor

Una vez creado el modelo, se agregan las propiedades del material, en cuyo caso la conductividad térmica, además de seleccionar un análisis térmico.

Se realiza un mallado refinando la zona que, del cordón de soldadura, ya que es la zona en la que se encuentra directamente en contacto con la zona de calor. (Figura 3-42)

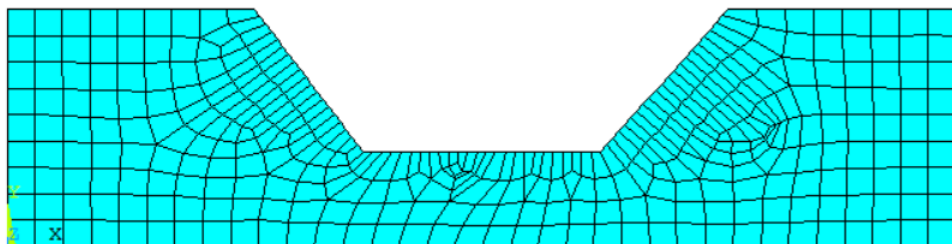


Figura 3-42: Mallado en Ansys Research

Fuente: Autor

Una vez se colocan las condiciones iniciales que en el presente caso de estudio es la temperatura superficial de 80°C, y el flujo térmico proporcionado por la fuente de soldadura.

Al finalizar el estudio se tiene la siguiente distribución de temperaturas, que se observa en las Figura 3-43 y 3-44, como se observa la zona más cercana a la fuente de temperatura alcanza temperaturas máxima que afecta a la ZAT, mientras que los bordes inferiores y laterales conservan las temperatura más baja que es 80°C.

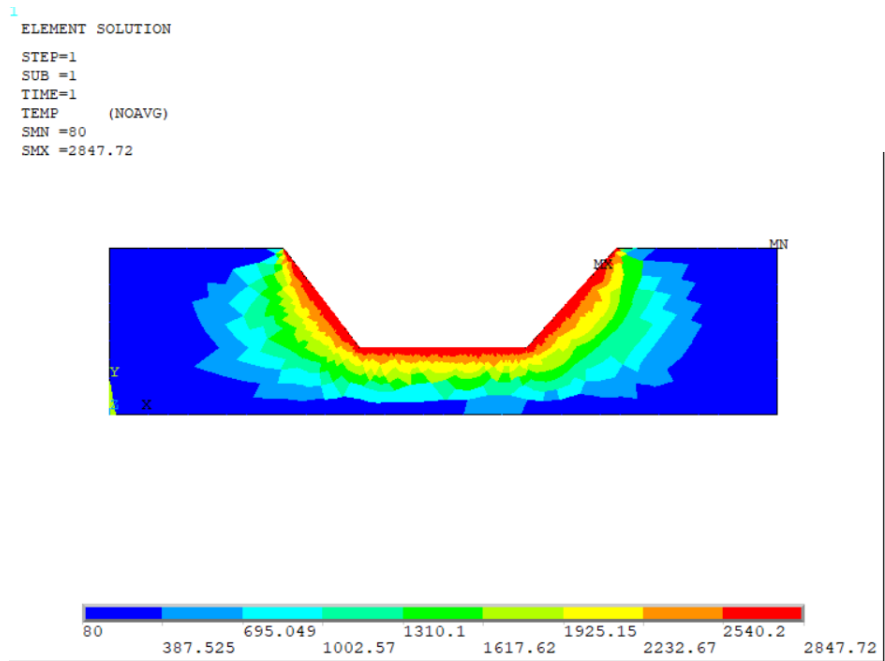


Figura 3-43: Distribución de Temperaturas por DEF Probeta 1 y 2

Fuente: Autor

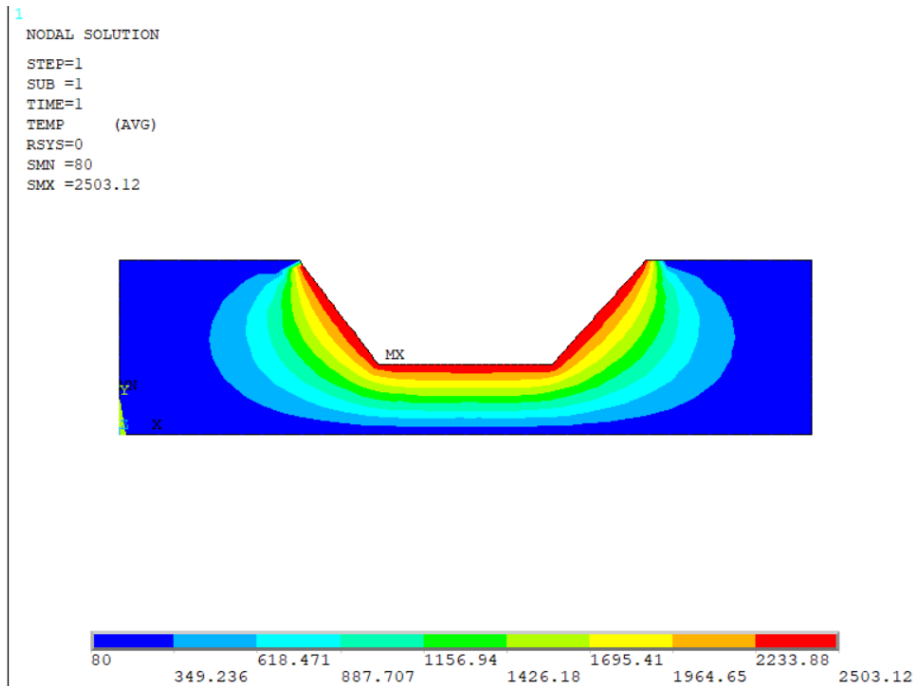


Figura 3-44: Distribución de Temperaturas por DEF Probeta 3 y 4


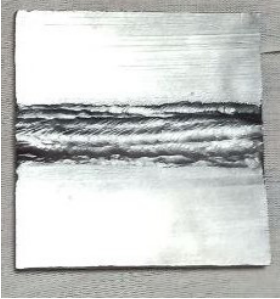

Fuente: Autor

3.1.3. Ensayos Realizados

La elaboración de ensayos de dureza y metalografía se han realizado para verificar los resultados analíticos y del diseño por elementos finitos. Con este propósito se ha replicado tres veces cada probeta, se trabajará con el promedio de las medidas.

Seguidamente se observan el proceso para la obtención de probetas que fueron ensayas, según la Tabla 3-39: Probetas Experimentales



Tabla 3-39: Probetas Experimentales

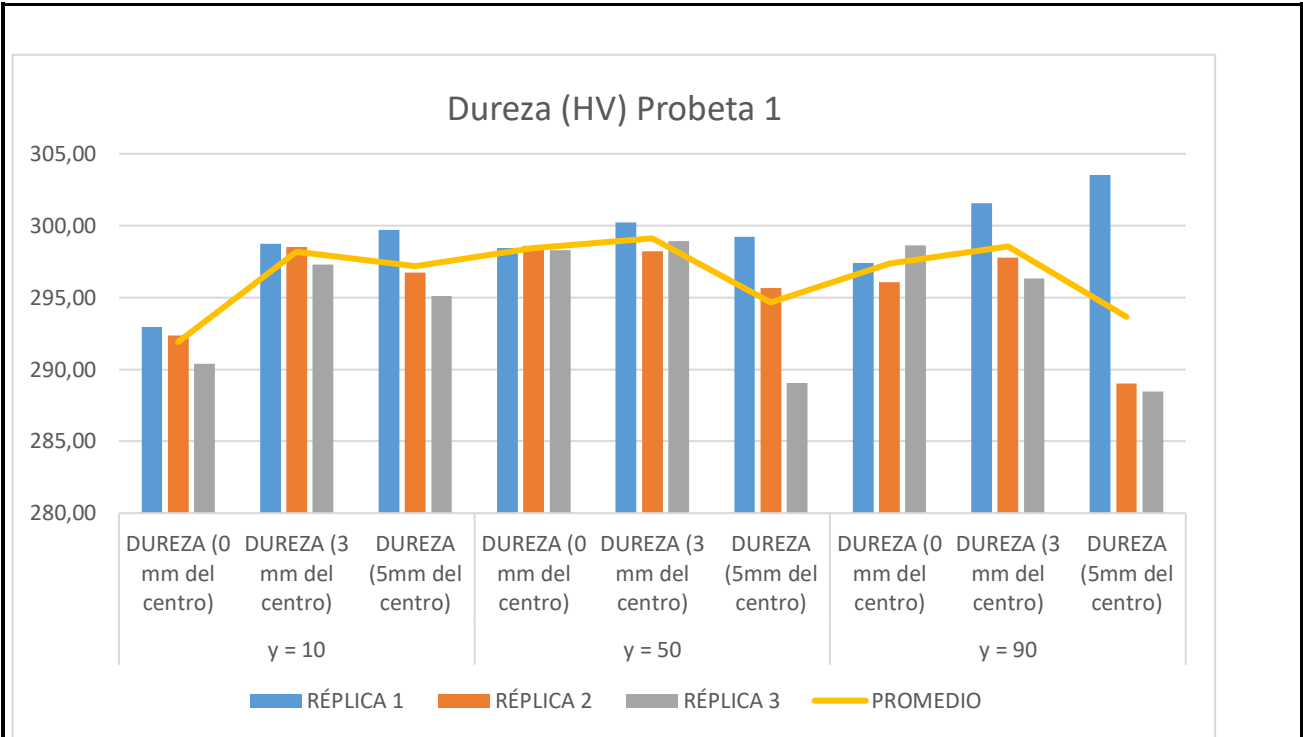
Proceso	Fotografía
Maquinado post corte con plasma, que se lo realiza para eliminar las zonas afectadas por el calor	
Probeta después del Proceso de Soldadura de Revenido por pases	
Pulido Post soldadura, efectuado para remover excedentes de material.	

Fuente: Autor

3.1.3.1. Ensayo de Dureza

Tabla 3-40: Registro de Datos Ensayo de Dureza, Probeta 01

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRÍA EN MECÁNICA MENCIÓN MANUFACTURA								
	FICHA DE INSPECCIÓN Y PRUEBAS								
	REPORTE ENSAYO DE DUREZA								
	Reg. No.: CIRT/21-REG-001		Revisión: 1		Hoja: 1 de 2				
Fecha: 29/05/2021									
PROBETA: P01			DIMENSIONES: 25x100x100 mm						
MATERIAL: Acero Inoxidable ASTM A743 CA6-NM			PLANO DE REFERENCIA: TTPS -06						
ESTADO: Fundición <input type="checkbox"/>			Soldadura <input checked="" type="checkbox"/>		Mecanizado <input type="checkbox"/>				
			Con TT <input type="checkbox"/>		Sin TT <input type="checkbox"/>				
DATOS INFORMATIVOS									
IDENTIFICACIÓN		ENSAYO			CONDICIONES AMBIENTALES				
Solicitado por: Ing. Ambar Yépez		Ensayo No: 01			Temperatura ambiente: 18°C				
Realizado por: Ing. Ambar Yépez		Fecha de realización: 29/05/2021			Humedad relativa: 68%				
PROTOCOLO DE ENSAYO									
Equipo: PROCEQ		Método: HV			Tiempo: 3 s				
Sonda: UCI		Norma Aplicable: ASTM A370-16							
Reloj: FM 1101/80									
RESULTADOS									
	y = 10 mm			y = 50 mm			y = 90 mm		
RÉPLICA	DUREZA (HV) (0 mm del centro)	DUREZA (HV) (3 mm del centro)	DUREZA (HV) (5mm del centro)	DUREZA (HV) (0 mm del centro)	DUREZA (HV) (3 mm del centro)	DUREZA (HV) (5mm del centro)	DUREZA (HV) (0 mm del centro)	DUREZA (HV) (3 mm del centro)	DUREZA (HV) (5mm del centro)
RÉPLICA 1	292,96	298,72	299,70	298,43	300,22	299,23	297,40	301,56	303,51
RÉPLICA 2	292,37	298,52	296,73	298,58	298,20	295,67	296,05	297,76	289,01
RÉPLICA 3	290,39	297,28	295,10	298,31	298,92	289,06	298,61	296,34	288,47
PROMEDIO	291,91	298,17	297,18	298,44	299,11	294,65	297,35	298,55	293,66





ANÁLISIS DE RESULTADOS

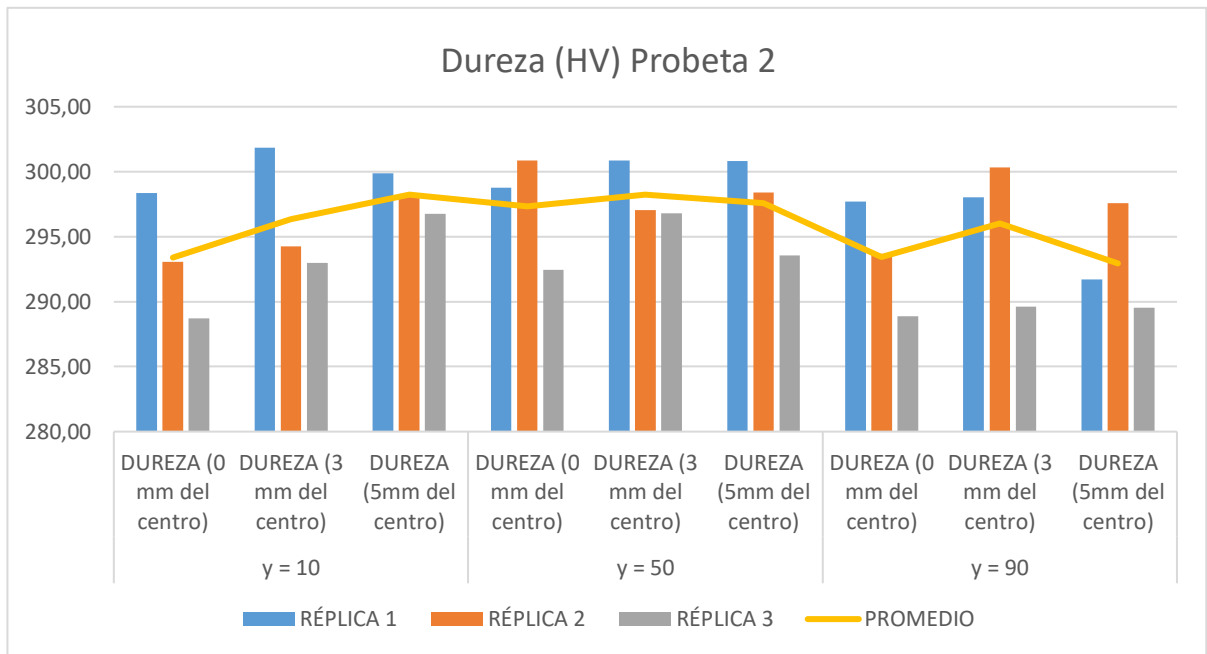
El valor de la dureza es mayor en las zonas cercanas al cordón de soldadura, debido que son las zonas de mayor impacto térmico. Se obtiene un valor de dureza mínimo de 288.47 HV y máximo de 303.510 HV. El promedio total de dureza es 296.559 HV

OBSERVACIONES

Realizado por: Ambar Yépez

Tabla 3-41: Registro de Datos Ensayo de Dureza, Probeta 02

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRÍA EN MECÁNICA MENCIÓN MANUFACTURA								
	FICHA DE INSPECCIÓN Y PRUEBAS								
	REPORTE ENSAYO DE DUREZA								
	Reg. No.: CIRT/21-REG-002		Revisión: 1		Hoja: 1 de 2				
Fecha: 29/05/2021									
PROBETA: P02			DIMENSIONES: 25x100x100 mm						
MATERIAL: Acero Inoxidable ASTM A743 CA6-NM			PLANO DE REFERENCIA: TTPS -06						
ESTADO: Fundición <input type="checkbox"/>			Soldadura <input checked="" type="checkbox"/>		Mecanizado <input type="checkbox"/>	Con TT <input type="checkbox"/>	Sin TT <input type="checkbox"/>		
DATOS INFORMATIVOS									
IDENTIFICACIÓN		ENSAYO			CONDICIONES AMBIENTALES				
Solicitado por: Ing. Ambar Yépez		Ensayo No: 01			Temperatura ambiente: 18°C				
Realizado por: Ing. Ambar Yépez		Fecha de realización: 29/05/2021			Humedad relativa: 68%				
PROTOCOLO DE ENSAYO									
Equipo: PROCEQ		Método: HV			Tiempo: 3 s				
Sonda: UCI		Norma Aplicable: ASTM A370-16							
Reloj: FM 1101/80									
RESULTADOS									
	y = 10 mm			y = 50 mm			y = 90 mm		
RÉPLICA	DUREZA (HV) (0 mm del centro)	DUREZA (HV) (3 mm del centro)	DUREZA (HV) (5mm del centro)	DUREZA (HV) (0 mm del centro)	DUREZA (HV) (3 mm del centro)	DUREZA (HV) (5mm del centro)	DUREZA (HV) (0 mm del centro)	DUREZA (HV) (3 mm del centro)	DUREZA (HV) (5mm del centro)
RÉPLICA 1	298,37	301,86	299,88	298,75	300,88	300,83	297,69	298,05	291,71
RÉPLICA 2	293,07	294,26	298,06	300,85	297,05	298,42	293,69	300,34	297,57
RÉPLICA 3	288,70	292,97	296,74	292,43	296,78	293,54	288,88	289,62	289,55
PROMEDIO	293,38	296,36	298,23	297,34	298,24	297,60	293,42	296,00	292,94



ANÁLISIS DE RESULTADOS



El valor de la dureza es mayor en las zonas cercanas al cordón de soldadura, debido que son las zonas de mayor impacto térmico. Sin embargo se encontró zonas en las cuales la dureza en la medición a 3mm es superior. Se obtiene un valor de dureza mínimo de 288.70 HV y máximo de 301.86 HV. El promedio total de dureza es 295.946 HV.

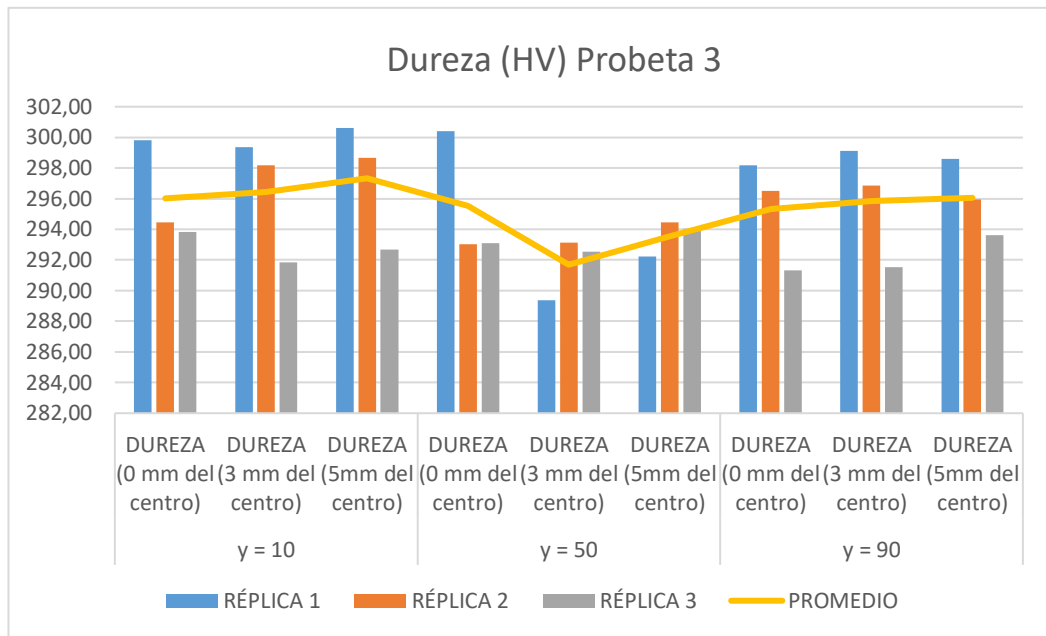
OBSERVACIONES

Realizado por:

Ambar Yépez

Tabla 3-42: Registro de Datos Ensayo de Dureza, Probeta 03

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRÍA EN MECÁNICA MENCIÓN MANUFACTURA								
	FICHA DE INSPECCIÓN Y PRUEBAS								
	REPORTE ENSAYO DE DUREZA								
	Reg. No.: CIRT/21-REG-003		Revisión: 1		Hoja: 1 de 2				
Fecha: 29/05/2021									
PROBETA: P03			DIMENSIONES: 25x100x100 mm						
MATERIAL: Acero Inoxidable ASTM A743 CA6-NM			PLANO DE REFERENCIA: TTPS -06						
ESTADO: Fundición <input type="checkbox"/>			Soldadura <input checked="" type="checkbox"/>		Mecanizado <input type="checkbox"/>	Con TT <input type="checkbox"/>	Sin TT <input type="checkbox"/>		
DATOS INFORMATIVOS									
IDENTIFICACIÓN		ENSAYO			CONDICIONES AMBIENTALES				
Solicitado por: Ing. Ambar Yépez		Ensayo No: 03			Temperatura ambiente: 18°C				
Realizado por: Ing. Ambar Yépez		Fecha de realización: 29/05/2021			Humedad relativa: 68%				
PROTOCOLO DE ENSAYO									
Equipo: PROCEQ		Método: HV			Tiempo: 3 s				
Sonda: UCI		Norma Aplicable: ASTM A370-16							
Reloj: FM 1101/80									
RESULTADOS									
	y = 10 mm			y = 50 mm			y = 90 mm		
RÉPLICA	DUREZA (HV) (0 mm del centro)	DUREZA (HV) (3 mm del centro)	DUREZA (HV) (5mm del centro)	DUREZA (HV) (0 mm del centro)	DUREZA (HV) (3 mm del centro)	DUREZA (HV) (5mm del centro)	DUREZA (HV) (0 mm del centro)	DUREZA (HV) (3 mm del centro)	DUREZA (HV) (5mm del centro)
RÉPLICA 1	299,80	299,36	300,62	300,42	289,38	292,23	298,17	299,12	298,60
RÉPLICA 2	294,47	298,17	298,68	293,04	293,14	294,44	296,52	296,85	295,94
RÉPLICA 3	293,82	291,83	292,69	293,10	292,55	294,02	291,33	291,52	293,63
PROMEDIO	293,38	296,36	298,23	297,34	298,24	297,60	293,42	296,00	292,94



ANÁLISIS DE RESULTADOS



El valor de la dureza es mayor en las zonas cercanas al cordón de soldadura, debido que son las zonas de mayor impacto térmico. Se obtiene un valor de dureza mínimo de 289.30 HV y máximo de 300.620 HV. El promedio total de dureza es 295.313 HV.

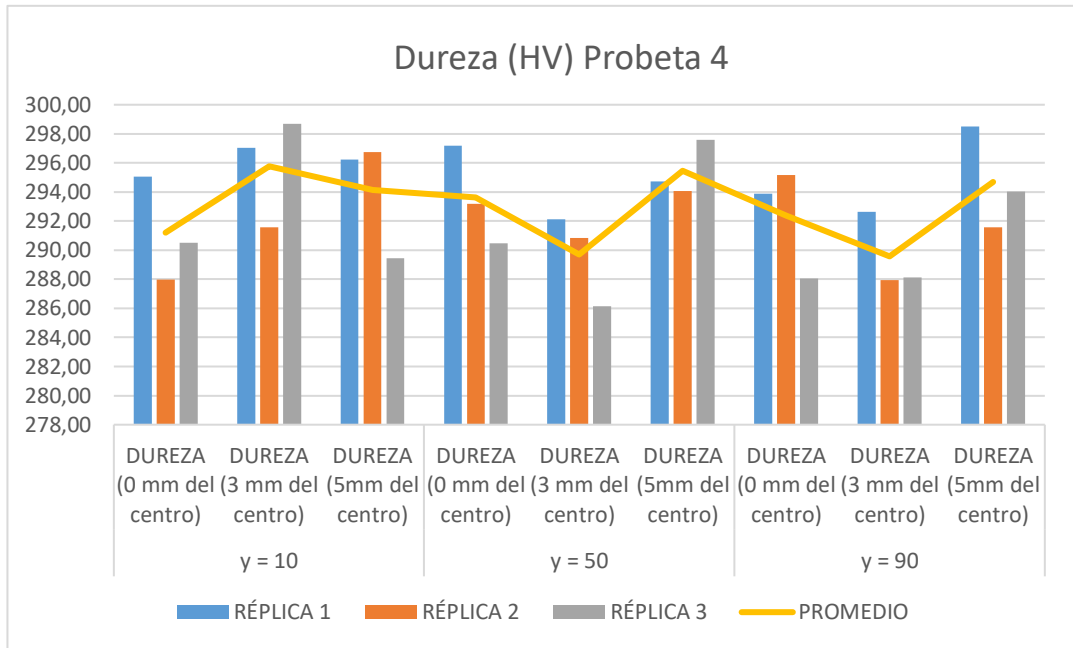
OBSERVACIONES

Realizado por:

Ambar Yépez

Tabla 3-43: Registro de Datos Ensayo de Dureza, Probeta 04

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRÍA EN MECÁNICA MENCIÓN MANUFACTURA								
	FICHA DE INSPECCIÓN Y PRUEBAS								
	REPORTE ENSAYO DE DUREZA								
	Reg. No.: CIRT/21-REG-004		Revisión: 1		Hoja: 1 de 2				
Fecha: 29/05/2021									
PROBETA: P04			DIMENSIONES: 25x100x100 mm						
MATERIAL: Acero Inoxidable ASTM A743 CA6-NM			PLANO DE REFERENCIA:			TTPS -06			
ESTADO: Fundición <input type="checkbox"/>		Soldadura <input checked="" type="checkbox"/>		Mecanizado <input type="checkbox"/>		Con TT <input type="checkbox"/>			
DATOS INFORMATIVOS									
IDENTIFICACIÓN		ENSAYO			CONDICIONES AMBIENTALES				
Solicitado por: Ing. Ambar Yépez		Ensayo No: 04			Temperatura ambiente: 18°C				
Realizado por: Ing. Ambar Yépez		Fecha de realización: 29/05/2021			Humedad relativa: 68%				
PROTOCOLO DE ENSAYO									
Equipo: PROCEQ		Método: HV			Tiempo: 3 s				
Sonda: UCI		Norma Aplicable: ASTM A370-16							
Reloj: FM 1101/80									
RESULTADOS									
	y = 10 mm			y = 50 mm			y = 90 mm		
RÉPLICA	DUREZA (HV) (0 mm del centro)	DUREZA (HV) (3 mm del centro)	DUREZA (HV) (5mm del centro)	DUREZA (HV) (0 mm del centro)	DUREZA (HV) (3 mm del centro)	DUREZA (HV) (5mm del centro)	DUREZA (HV) (0 mm del centro)	DUREZA (HV) (3 mm del centro)	DUREZA (HV) (5mm del centro)
RÉPLICA 1	295,07	297,02	296,24	297,18	292,11	294,73	293,87	292,65	298,51
RÉPLICA 2	287,98	291,58	296,75	293,20	290,82	294,07	295,18	287,93	291,57
RÉPLICA 3	290,52	298,70	289,43	290,46	286,15	297,58	288,06	288,14	294,03
PROMEDIO	291,19	295,77	294,14	293,61	289,69	295,46	292,37	289,57	294,70



ANÁLISIS DE RESULTADOS

El valor de la dureza es mayor en las zonas cercanas al cordón de soldadura, debido que son las zonas de mayor impacto térmico. Sin embargo se encontró zonas en las cuales la dureza en la medición a 3mm es superior. Se obtiene un valor de dureza mínimo de 286.150 HV y máximo de 298.70 HV. El promedio total de dureza es 292.646 HV.



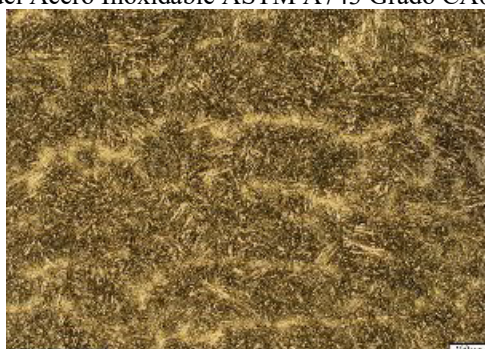
OBSERVACIONES

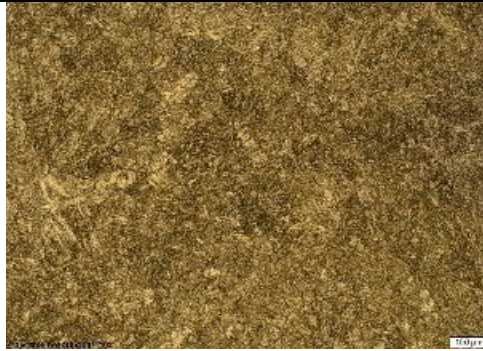
Realizado por:

Ambar Yépez

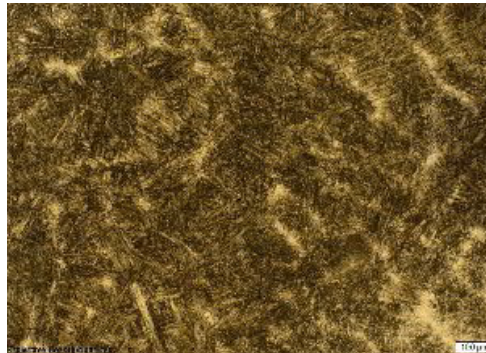
3.1.3.2. Registro Datos Estructura Cristalina

Tabla 3-44: Metalografía Acero Inoxidable Probeta 01

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRÍA EN MECÁNICA MENCIÓN MANUFACTURA		
	FICHA DE INSPECCIÓN Y PRUEBAS		
	REPORTE ENSAYO METALOGRAFICO		
	Reg. No.: CIRT/21-REG-001	Revisión: 1	
Fecha: 30/05/2021			
PROBETA: P01	DIMENSIONES:	25x100x100 mm	
MATERIAL: Acero Inoxidable ASTM A743 CA6-NM	PLANO DE REFERENCIA:	TTPS-06	
ESTADO: Fundición <input type="checkbox"/>	Soldadura <input checked="" type="checkbox"/>	Mecanizado <input type="checkbox"/>	Con TT <input type="checkbox"/>
			Sin TT <input type="checkbox"/>
DATOS INFORMATIVOS			
IDENTIFICACIÓN	ENSAYO	CONDICIONES AMBIENTALES	
Solicitado por: Ing. Ambar Yépez	Ensayo No: 01	Temperatura ambiente: 18°C	
Realizado por: Ing. Ambar Yépez	Fecha de realización: 30/05/2021	Humedad relativa: 68%	
PROTOCOLO DE ENSAYO			
Equipo: Microscopio óptico invertido	Preparación de la Superficie: Pulido Mecánico		
No. De Serie: Olympus GX51 / 5H42662	Tiempo de Preparación: 1 hora		
Norma Aplicable: ASTM E3-11 ASTM E407-07e1	Tiempo de Ataque: 135 seg		
	Reactivo: Vilella (1 g ácido pícrico + 5 mL HCl + 100 mL etanol)		
RESULTADOS			
Fotografías de la microestructura del Acero Inoxidable ASTM A743 Grado CA6-NM			
			
Material base			



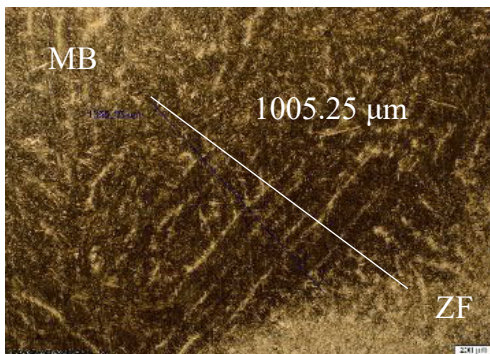
Zona de Fusión



Zona Térmicamente Afectada

ANÁLISIS DE RESULTADOS

1. Análisis de la microestructura ZAT



Ancho de ZAT = 1005.25 μm

Componentes:

Martensita revenida





Ferrita

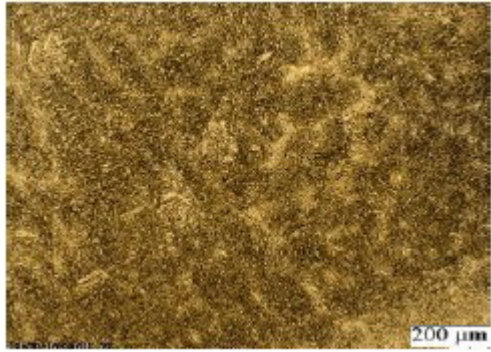
OBSERVACIONES

Realizado por:

Ambar Yépez

Tabla 3-45: Metalografía Acero Inoxidable Probeta 02

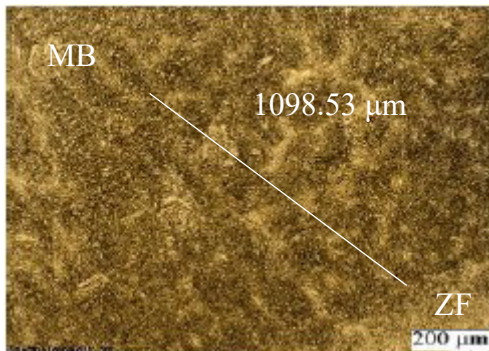
	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRÍA EN MECÁNICA MENCIÓN MANUFACTURA		
	FICHA DE INSPECCIÓN Y PRUEBAS		
	REPORTE ENSAYO METALGRÁFICO		
	Reg. No.: CIRT/21-REG-002	Revisión: 1	
Fecha: 30/05/2021			
PROBETA: P02	DIMENSIONES:	25x100x100 mm	
MATERIAL: Acero Inoxidable ASTM A743 CA6-NM	PLANO DE REFERENCIA:	TTPS-06	
ESTADO: Fundición <input type="checkbox"/>	Soldadura <input checked="" type="checkbox"/>	Mecanizado <input type="checkbox"/>	Con TT <input type="checkbox"/>
			Sin TT <input type="checkbox"/>
DATOS INFORMATIVOS			
IDENTIFICACIÓN	ENSAYO	CONDICIONES AMBIENTALES	
Solicitado por: Ing. Ambar Yépez	Ensayo No: 02	Temperatura ambiente: 18°C	
Realizado por: Ing. Ambar Yépez	Fecha de realización: 30/05/2021	Humedad relativa: 68%	
PROTOCOLO DE ENSAYO			
Equipo: Microscopio óptico invertido	Preparación de la Superficie: Pulido Mecánico		
No. De Serie: Olympus GX51 / 5H42662	Tiempo de Preparación: 1 hora		
Norma Aplicable: ASTM E3-11 ASTM E407-07e1	Tiempo de Ataque: 135 seg		
	Reactivo: Vilella (1 g ácido pícrico + 5 mL HCl + 100 mL etanol)		
RESULTADOS			
Fotografías de la microestructura del Acero Inoxidable ASTM A743 Grado CA6-NM			
			
Material base			
			
Zona de Fusión			



Zona Térmicamente Afectada

ANÁLISIS DE RESULTADOS

1. Análisis de la microestructura ZAT



Ancho de ZAT = 1098.53 μm

Componentes:

Martensita revenida





Ferrita

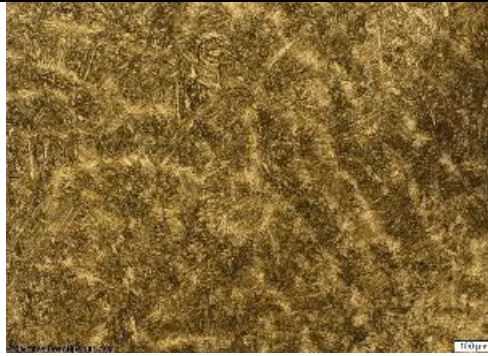
OBSERVACIONES

Realizado por:

Ambar Yépez

Tabla 3-46: Metalografía Acero Inoxidable Probeta 03

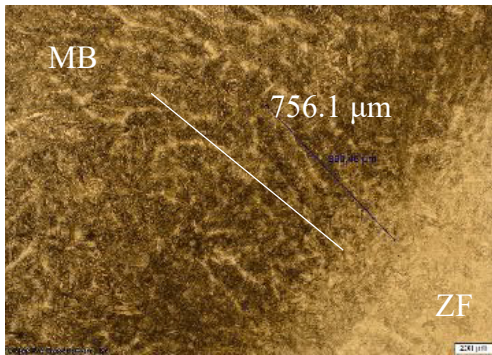
	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRÍA EN MECÁNICA MENCIÓN MANUFACTURA		
	FICHA DE INSPECCIÓN Y PRUEBAS		
	REPORTE ENSAYO METALGRÁFICO		
	Reg. No.: CIRT/21-REG-003	Revisión: 1	
Fecha: 30/05/2021			
PROBETA: P03	DIMENSIONES:	25x100x100 mm	
MATERIAL: Acero Inoxidable ASTM A743 CA6-NM	PLANO DE REFERENCIA:	TTPS-06	
ESTADO: Fundición <input type="checkbox"/>	Soldadura <input checked="" type="checkbox"/>	Mecanizado <input type="checkbox"/>	Con TT <input type="checkbox"/>
			Sin TT <input type="checkbox"/>
DATOS INFORMATIVOS			
IDENTIFICACIÓN	ENSAYO	CONDICIONES AMBIENTALES	
Solicitado por: Ing. Ambar Yépez	Ensayo No: 03	Temperatura ambiente: 18°C	
Realizado por: Ing. Ambar Yépez	Fecha de realización: 30/05/2021	Humedad relativa: 68%	
PROTOCOLO DE ENSAYO			
Equipo: Microscopio óptico invertido	Preparación de la Superficie: Pulido Mecánico		
No. De Serie: Olympus GX51 / 5H42662	Tiempo de Preparación: 1 hora		
Norma Aplicable: ASTM E3-11 ASTM E407-07e1	Tiempo de Ataque: 135 seg		
	Reactivo: Vilella (1 g ácido pícrico + 5 mL HCl + 100 mL etanol)		
RESULTADOS			
Fotografías de la microestructura del Acero Inoxidable ASTM A743 Grado CA6-NM			
			
Material base			
			
Zona de Fusión			



Zona Térmicamente Afectada

ANÁLISIS DE RESULTADOS

1. Análisis de la microestructura ZAT



Ancho de ZAT = 756.1 μm

Componentes:

Martensita revenida





Ferrita

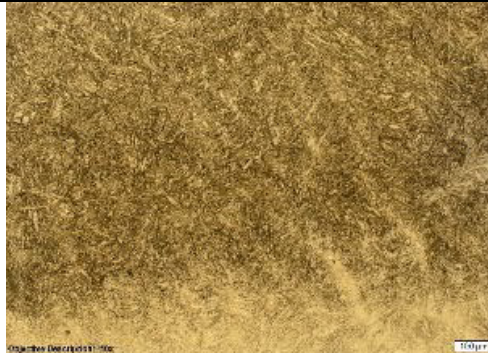
OBSERVACIONES

Realizado por:

Ambar Yépez

Tabla 3-47: Metalografía Acero Inoxidable Probeta 04

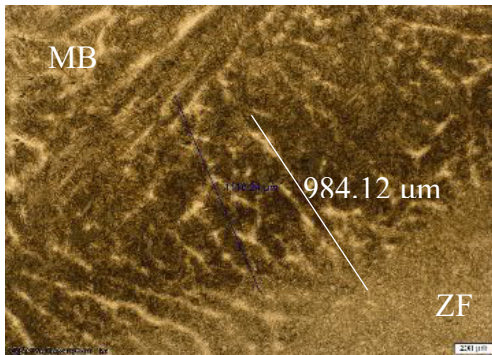
	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA MAESTRÍA EN MECÁNICA MENCIÓN MANUFACTURA		
	FICHA DE INSPECCIÓN Y PRUEBAS		
	REPORTE ENSAYO METALGRÁFICO		
	Reg. No.: CIRT/21-REG-004	Revisión: 1	
Fecha: 30/05/2021			
PROBETA: P04	DIMENSIONES:	25x100x100 mm	
MATERIAL: Acero Inoxidable ASTM A743 CA6-NM	PLANO DE REFERENCIA:	TTPS-06	
ESTADO: Fundición <input type="checkbox"/>	Soldadura <input checked="" type="checkbox"/>	Mecanizado <input type="checkbox"/>	Con TT <input type="checkbox"/>
			Sin TT <input type="checkbox"/>
DATOS INFORMATIVOS			
IDENTIFICACIÓN	ENSAYO	CONDICIONES AMBIENTALES	
Solicitado por: Ing. Ambar Yépez	Ensayo No: 04	Temperatura ambiente: 18°C	
Realizado por: Ing. Ambar Yépez	Fecha de realización: 30/05/2021	Humedad relativa: 68%	
PROTOCOLO DE ENSAYO			
Equipo: Microscopio óptico invertido	Preparación de la Superficie: Pulido Mecánico		
No. De Serie: Olympus GX51 / 5H42662	Tiempo de Preparación: 1 hora		
Norma Aplicable: ASTM E3-11 ASTM E407-07e1	Tiempo de Ataque: 135 seg		
	Reactivo: Vilella (1 g ácido pícrico + 5 mL HCl + 100 mL etanol)		
RESULTADOS			
Fotografías de la microestructura del Acero Inoxidable ASTM A743 Grado CA6-NM			
			
Material base			
			
Zona de Fusión			



Zona Térmicamente Afectada

ANÁLISIS DE RESULTADOS

1. Análisis de la microestructura ZAT



Ancho de ZAT = 984.12 μm

Componentes:

Martensita revenida

Ferrita

OBSERVACIONES

Realizado por:

Ambar Yépez

3.1.4. Comparación de Datos

La Tabla 3-48 muestra los resultados experimentales y analíticos además del error hallado.

Tabla 3-48: Cálculo de Errores

TAMAÑO ZAT (mm)			
PROBETA	CALCULADO	MICROGRAFÍA	%ERROR
PROBETA 1	0,85	1,00525	15,44%
PROBETA2	1,06	1,09853	3,51%
PROBETA 3	0,64	0,7561	15,36%
PROBETA 4	0,8	0,98412	18,71%

DUREZA (HV)			
PROBETA	CALCULADO	MICROGRAFÍA	%ERROR
PROBETA 1	293,69	296,559	1,96%
PROBETA2	293,69	295,946	0,76%
PROBETA 3	286,1	295,313	3,12%
PROBETA 4	279,25	292,946	4,68%

TEMPERATURA (°C)			
PROBETA	CALCULADO	DEF	%ERROR
PROBETA 1	2.891,00	2847,72	1,52%
PROBETA2	2.891,00	2847,72	1,52%
PROBETA 3	2.457,90	2503,12	1,81%
PROBETA 4	2.457,90	2503,12	1,81%

Fuente: Autor

Como se puede observar en las tablas, los mayores errores fueron en el tamaño ZAT, lo cual se puede deber a la apreciación del microscopio.

Referente a los errores de dureza son mínimos salvo en el caso de la probeta 1 en el cual superara el nivel de confianza del 95%.

Con respecto a los errores de la simulación son menores al 5%, lo cual establece que se un modelado que puede predecir la distribución de calor en el cordón de soldadura.

3.2. Verificación de Hipótesis

Según los datos proporcionados por el Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas, se tienen ensayos de procesos de soldadura de pases permite obtener dicha información para comparar con la obtenida tanto analíticamente, computacionalmente como experimentalmente.

La verificación de hipótesis se realizará con la técnica t-Student, que consiste en una distribución de probabilidad, la cual se basa en el cálculo de la media poblacional.

Hipótesis Alternativa: Un modelo numérico del proceso de soldadura de revenido en los rodetes tipo Pelton, permitirá obtener propiedades mecánicas en la zona ZAT similares a las del sustrato.

Hipótesis Nula: Un modelo numérico del proceso de soldadura de revenido en los rodetes tipo Pelton, no permitirá obtener propiedades mecánicas en la zona ZAT similares a las del sustrato.

$H_0 > 295.941 \text{ HV} \pm 5$ (Dureza promedio obtenida de ensayos)

$H_1 < 295.941 \text{ HV} \pm 5$

$$n = 4$$

$$v = n-1$$

$$v = 3$$

Nivel de confianza: 90%

Nivel de significancia α : 10%

$$\frac{\alpha}{2} = \frac{10\%}{2} = 5\%$$

Datos obtenidos en el experimento:

Dureza: $293.69 + 293.69 + 286.10 + 279.25$

Media = 288.24

Desviación estándar = 3.16

$$Error = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{3.16}{\sqrt{4}} = 1.58$$

$$t = \frac{\hat{y} - u}{Error} = \frac{288.18 - 290.94}{1.58} = 1.74$$

$$t = \frac{\hat{y} - u}{Error} = \frac{288.18 - 300.94}{1.58} = 8.075$$

El valor de t_{tablas} , se lo puede obtener con el número de grados de libertad y el nivel de significancia, como se muestra en la Tabla 3-49

Tabla 3-49: Tabla T Student

v	0.25	0.1	0.05	0.025	0.01
1	1	3.077	6.313	12.706	31.821
2	0.816	1.855	2.920	4.302	6.964
3	0.764	1.637	2.353	3.182	4.540
4	0.740	1.533	2.131	2.776	3.746

Fuente:[48]

Por lo tanto $t_{tablas} = 1.637$.

Como $t_{tablas} < t_{calculado}$ se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, lo que representa un modelo numérico del proceso de soldadura de revenido en los rodetes tipo Pelton, permitirá obtener propiedades mecánicas en la zona ZAT similares a las del sustrato.

CAPÍTULO IV

DESARROLLO DE LA PROPUESTA

4.1. Descripción

Con la realización del estudio de soldadura, se desarrolla el siguiente procedimiento para el Proceso de Recuperación de Turbinas Pelton bajo la soldadura de Pases de Revenido conocida como Temper Bead.

4.2. Objetivos

4.2.1. Objetivo General

Desarrollar el proceso para Recuperación de Turbinas Pelton, empleando el método de soldadura Temper Bead para mejorar las propiedades mecánicas de la Zona Térmicamente Afectada.

4.2.2. Objetivos Específicos

- Definir las etapas del proceso de recuperación de turbinas Pelton a emplearse en el Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas.
- Definir los parámetros de soldadura para el proceso de Soldadura por Pases a realizarse para recuperar turbinas de acero martensítico.
- Ejecutar un análisis por elemento finitos que prediga la temperatura a obtenerse para control de la zona ZAT.

4.3. Desarrollo

A continuación, se detalla el proceso a realizar:

4.3.1. Viabilidad

Para realizar el proceso de recuperación de turbinas el CIRT para de la solicitud de reparación elaborada por las Centrales Hidroeléctricas, una vez la autorización se realiza una inspección de planos para poder plantear una proforma y cronograma de actividades. Si la entidad contratante está de acuerdo, se empieza a realizar las órdenes de trabajo para el personal.

4.3.2. Planificación

Como primer punto se realiza un control inicial al rodete mediante fichas de inspección, como la observada en la Figura 4-1.



		FICHA DE ESPECIFICACIONES DE CALIDAD										
		RECUPERACIÓN DE RODETES HIDRÁULICOS <i>Quality Specification Sheet</i>										
Reg. No.:		ETT-REG-FC01	Revisión: 1	Hoja: 1 de 1								
Cliente:		CELEC EP	Fecha:	10/05/2017								
EQUIPO/PIEZA:		Rodete tipo Francis		CANTIDAD:		1						
DIMENSIONES:		DE=3350 mm., DI: 2800 mm.		PESO UNITARIO:		17500 Kg						
FABRICANTE:		Mitsubishi Heavy Industries, LTD.		PLAN DE CALIDAD No.:		ETT-PC-01-2017						
No. SERIE:		6-3868490100		PLANO DE REFERENCIA:		WA-B1100R-2/WA-B1110 R-4						
CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL												
DESIGNACIÓN: DIN 1. 4313 G-X5												
DESIGNACIÓN ESTÁNDAR:		ASTM A743		GRADO:		CA6-NM						
TRATAMIENTO TÉRMICO:		Recocido <input type="checkbox"/>		Normalizado <input type="checkbox"/>		Templado <input checked="" type="checkbox"/>						
						Revenido <input checked="" type="checkbox"/>						
Valores Requeridos	Composición Química	Cr %	Ni %	Mo %	C %	Mn %	Si %	S %	P %			
		11.5 - 14.0	3.5 - 4.5	0.4 - 1	≤ 0.06	≤ 1	≤ 1	≤ 0.03	≤ 0.04			
	Propiedades Mecánicas	St (MPa)	Sy (MPa)	EL %	Z %	Dureza (HB)						
		≥ 755	≥ 550	≥ 15	≥ 35	240 - 285						
Ensayos de propiedades mecánicas de acuerdo a ASTM A370												
ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS END												
Los niveles de calidad requeridos para cada ensayo están listados a continuación.												
Especi- ficación	Zonas	(a)	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
	Ensayos	(b)	F M	F M	F M	F M	F M	F M	F M	F M	F M	F M



Figura 4-1: Ficha de inspección de Calidad

Fuente: CIRT

Al finalizar la inspección se debe realizar la limpieza general al rodete.

4.3.3. Ejecución

La ejecución del proceso de Recuperación de Rodetes se establece en el siguiente Procedimiento

	<p style="text-align: center;">PROCEDIMIENTO PARA RECUPERACIÓN DE RODETES HIDRÁULICOS TIPO PELTON DE ACERO INOXIDABLE MARTENSÍTICO</p>	
<p style="text-align: center;">1. Objetivo</p> <p>Instaurar una metodología adecuada para el proceso de recuperación de Rodetes Pelton cuyo material de manufactura sea acero inoxidable martensítico ASTM A743 grado CA6-NM, alineado a las normativas vigentes de manera que se mantengan o mejoren las propiedades mecánicas para asegurar un adecuado funcionamiento.</p> <p style="text-align: center;">2. Alcance</p> <p>El presente procedimiento es aplicable para trabajos de reparación parciales y/o totales involucrados en el proceso de recuperación de Rodetes Pelton cuyo material de manufactura sea acero inoxidable martensítico ASTM A743 grado CA6-NM.</p> <p style="text-align: center;">3. ESTÁNDARES Y NORMAS</p> <ul style="list-style-type: none">• ASTM A743/A743M Especificación Estándar para Fundiciones de Hierro-Cromo, Hierro-Cromo-Níquel, Resistentes a Corrosión para Aplicación General.• ASTM A370 Definiciones y Métodos de Prueba para Ensayos Mecánicos de Productos de Acero.• CCH 70-4 Especificaciones para la Inspección de Fundiciones de Acero para Máquinas Hidráulicas		

- Código Internacional de Calderas y Recipientes a Presión ASME Sección IX Calificaciones de Soldadura.

4. GENERALIDADES

El proceso de recuperación de un Rodete Pelton consiste en el estudio de la geometría del mismo, localización de fallas, y ejecución de un proceso de soldadura en las partes desgastadas, erosionadas o cavitadas; de tal forma que el material añadido tenga las mismas o mejores propiedades mecánicas que el material base, garantizando la recuperación del funcionamiento.

Para llevar a cabo este proceso es necesario la planificación de todas las operaciones a realizarse, especialmente el modelado para la manufactura por CNC.

5. DEFINICIONES

- Boquilla: La boquilla se utiliza para aumentar la energía cinética del agua que golpeará los cubos o paletas conectados al canal
- Canguilones: En una turbina de rueda Pelton, el rodete o pala es un disco circular en cuya periferia se fijan varios cangilones uniformemente alineados. El cangilón es una taza o cuenco semiesférico doble que se divide en dos partes simétricas mediante una pared divisoria conocida como divisor.
- Carcasa: El revestimiento exterior de la turbina Pelton se denomina carcasa, que está hecha de hierro fundido o de placas de acero fabricadas.
- Chorro de ruptura : Cuando el chorro de agua se cierra por completo al empujar la lanza hacia delante, el volumen de agua que golpea el corredor se convierte en cero. Sin embargo, el corredor sigue corriendo debido a la inercia del corredor.
- Rizo de Rodete: Elemento mecánico que transforma la energía hidráulica del agua en energía mecánica



Figura 4-2: Rodete Pelton

Fuente: Autor

6. REQUERIMIENTOS TÉCNICOS

- Especificaciones de composición química del material.
- Especificaciones de propiedades mecánicas del material.
- Planos del rodete
- Historial de reparaciones previas.

7. PROCEDIMIENTO

7.1 ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD

- Inspección visual del rodete
- Proceso de ingeniería inversa para dimensionar
- Ensayos no destructivos para medir identificar defectos y desgaste.
- Realizar una planificación metodológica que contenga proformas, materiales a emplear, cronograma de trabajo y órdenes de trabajo.
- Elaborar el PMI (Project Management Institute) referido al acta del proyecto.

7.2 LIMPIEZA INICIAL

- Localizar el rodete Pelton con soportes fijos en el área de limpieza, y retirar las impurezas empleando agua a presión.
- En el caso de existir residuos grasos se proceden a retirar con desengrasante.
- En el caso de existir residuos metálico se retiran de manera manual con martillo.

7.3 INSPECCIÓN INICIAL

- Realizar el ensayo de espectrometrías, para confirmar la composición química del material.
- Evaluación de los defectos mediante una inspección visual, la cual revele los daños por desgaste. Esta inspección se la debe realizar por toda la geometría.
- Realizar marcaciones en las cuales se localizarán las plantillas de inspeccionar, y realizar el proceso de inspección.
- Realizar el proceso de ingeniería inversa dimensional total.
- Realizar medidas de dureza en el material.
- Realizar ensayos no destructivos que revelen desgaste.
- Cuantificar la profundidad y calcular la severidad, de esta manera se conocerá el material de aporte a utilizar.

7.4 PROCESO DE MAQUINADO INICIAL

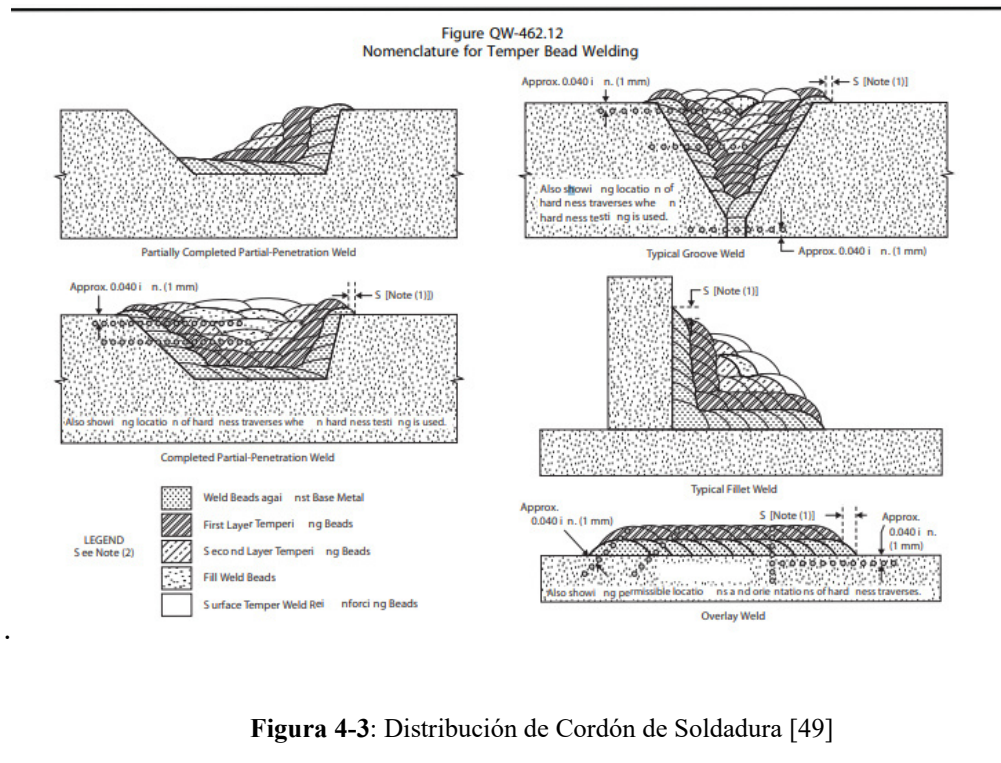
- Realizar el desbaste inicial para retirar el material desgastado en los límites del rodete, para ello se deben realizar operaciones de pulido hasta obtener una superficie lisa.
- El pulido se debe realizar en toda la superficie del rodete.

7.5 PROCESO DE SOLDADURA POR PASES DE REVENIDO

Las partes desgastadas del rodete son recuperadas mediante la aplicación de material de aporte, producto de soldadura. Este proceso se lo efectúa en todas las áreas en las cuales se evidencia un desgaste, fisura, grieta. La finalidad de este proceso es reintegrar la geometría del rodete para que recupere su tiempo de vida útil.

7.5.1 Parámetros de Soldadura

El proceso de soldadura por pases de revenido una técnica de deposición controlada que requiere que el soldador coloque cordones de soldadura de tamaño controlado a intervalos específicos, teniendo en cuenta que la colocación de un segundo cordón de soldadura afectará a las propiedades del primer cordón de soldadura y su zona afectada por el calor ZAT. El solapamiento requerido, de acuerdo con la Sección IX, está entre el 25% y el 75%. En la Figura 4-3 se observa la distribución de cordones de soldadura.



El proceso a realizar es la soldadura GTAW

Características de la atmósfera protectora

CAPA(S) DE SOLDADURA	GAS DE APORTE	CAUDAL (LT/MIN)
RAÍZ	Argón pureza 99%	6-8
RELLENO	GTAW	6-8
CAPA FINAL	GTAW	6-8

Características de la energía de entrada

CAPA(S) DE SOLDADURA	RANGO DE AMPERAJE (A)	VOLTAJE(V)	VELOCIDAD DE AVANCE (mm/min)
RAÍZ	130-150	11-13	200- 215
RELLENO	150-170	11-13	200 - 215
CAPA FINAL	150-170	11-13	200 - 215

Características del Material de Aporte

Electrodo 410 NiMO, de diámetro 2.4 mm.

- Para el proceso de soldadura el rodete debe estar localizado sobre la mesa de trabajo.
- Realizar un precalentamiento de la zona en un intervalo de 70 – 90 °C.
- Realizar el primer cordón o de rellano por toda la superficie, como se muestra en la Figura 4-3.
- Realizar el control de temperatura a una distancia de 25mm con respecto al eje del cordón, misma que no debe superara los 120°C.
- El ancho de cordón se estipula en 6mm y la garganta 2mm, de este modo la energía de entrada al material será de menor impacto para la ZAT.
- Una vez el área de soldadura esté a una temperatura de 80°C, realizar el siguiente pase y así sucesivamente hasta rellenar completamente.

- Soldar todos los cangilones, incluida las áreas laterales.
- Una vez enfriado el rodete rotarlo de tal manera que se pueda acceder a todas las áreas que necesiten relleno de material.
- Al finalizar la soldadura se realizan ensayos no destructivos como: Inspección Visual, Tintas Penetrantes, Partículas Magnéticas Fluorescentes, mismos que permiten localizar defectos de soldadura.

7.6 MECANIZADO FINAL

El mecanizado final consiste en la eliminación del material excedente presente después del proceso de soldadura para ello se debe pulir todas las superficies adoptando una posición horizontal.

7.7 INSPECCIÓN FINAL

La inspección final se realiza para evaluar al rodete mediante los siguientes procesos:

- Bajo la Norma ISO 1940 balance estático.
- Realizar inspección visual por toda la superficie del rodete
- Realizar ensayo de tintas penetrantes
- Realizar ensayo de partículas magnéticas
- Realizar ensayo por ultrasonido.
- Mediante el uso de platillas se debe verificar el perfil

8. EQUIPOS Y HERRAMIENTAS

- Grúa / Puente grúa.
- Torno vertical (herramientas de medición integradas).
- Soldadoras eléctricas para proceso GTAW
- Hidrolavadora de alta presión.
- Cinceles, martillos.
- Plantillas de medición, calibrador vernier y regla de precisión.
- Pirómetro.

- Durómetro portátil.
- Espectrómetro de emisión óptica.
- Equipo de detección de fallas por ultrasonido y arreglo de fases.
- Equipo de partículas magnéticas
- kit de tintas penetrantes.

9. MEDIDAS DE SEGURIDAD

- Utilizar equipo de protección personal
- Verificar la sujeción del rodete

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

- Para el desarrollo del trabajo de investigación se realizó una ardua búsqueda bibliográfica, la cual consistió en soldadura de revenido, ciclo de soldadura, temperaturas en el ciclo de la soldadura, mismos que se basan en el efecto que tiene la fuente de soldadura respecto a cualquier punto del material base, como se evidencia en los cálculos realizados en el Capítulo III, en los cuales se detalló la temperatura para distancias en x desde un milímetro hasta 60 milímetros, en y desde 0 milímetros hasta 5 milímetros.
- En base a la recopilación de la base científica y con la realización de cálculos el proceso que obtuvo la distribución de calor óptima es el que tiene intensidad de corriente inicial a 160A, intensidad de corriente en segundo pase hasta 200 A y una velocidad de avance igual a 200 mm/min, aquí se redujo la temperatura hasta un 20%, lo cual significa que no se provocará un cambio de estructura cristalina drástico, mismo que afecta la propiedad mecánica dureza, volviendo al sustrato en un material muy frágil, queriendo evitar esto debido al funcionamiento del mismo.
- La dureza calculada utilizando las fórmulas propuestas por Yurioka para la Zona Térmicamente Afectada es en promedio 293.41 HV solo superior por 10 HV al material base, lo cual resulta en un experimento óptimo y ratifica la aplicabilidad de la soldadura de pases de revenido.
- Para la realización experimental de la presente investigación se realizó el proceso de soldadura por pases de revenido y se pulió la soldadura para retirar el material excedente, de forma idéntica al proceso a realizarse para recuperar una turbina; se realizaron pruebas de dureza a lo largo de la zona ZAT, las cuales obtuvieron resultados de 269.56 HV para la Probeta 1, 295.95 HV para la Probeta 2, 295.31 para la Probeta 3, y 292.95 para la Probeta 4; así como metalografías con el propósito de comparar los datos obtenidos de forma

analítica, en las metalografías se obtuvieron microestructuras de forma martensita revenida en la ZAT en todas las probetas, esto determina la optimización de propiedades mecánicas y la funcionalidad del material base.

- Experimentalmente el menor ancho de la Zona Térmica Afectada se encontró en la probeta tres, misma que mantenía una intensidad de corriente constante, pero un avance de soldadura 40% mayor que en los otros casos de estudio. Se considera que es efectivo reducir el tamaño ZAT así como reducir la dureza del mismo.
- El efecto de la magnitud de avance de soldadura es inversamente proporcional al flujo de calor, quedando demostrado en los cálculos ya que el experimento con mayor velocidad de avance dio los mejores resultados de distribución de calor, como se comprobó con las probetas 3 y 4 en los cuales los anchos de ZAT son 0.7561 mm y 0.98412 mm.
- El efecto de la intensidad de corriente respecto a la distribución de calor es proporcional, a mayor cantidad de intensidad de corriente mayor será el flujo de calor de entrada, un flujo muy alta afectará las zonas aledañas al cordón, alertando las propiedades mecánicas.
- En el presente trabajo de investigación se ha realizado el modelado utilizando el software en Ansys Research, en el cual se ha determinado la variación de la misma desde la capa superficial hacia el interior del material base, de esta manera se obtuvo una temperatura superficial para el primer pase de 2847.72 °C que varía en 1.52% respecto a los cálculos realizados, para el caso de las Probetas 1 y 2; 2503.12 °C que varía en 1.81% respecto a los cálculos realizados, para el caso de las Probetas 3 y 4.
- El modelado numérico de distribución de temperatura fue elaborado como placa, debido a que era más preciso al mallar. Adicionalmente las temperaturas calculadas por el software difieren en un 1.8% respecto a los cálculos, lo que

determinaría una simplificación analítica, y puede ayudar a la toma de decisiones en cuanto a los parámetros de soldadura.

- Se ha desarrolla una propuesta para el Proceso de Recuperación de Rodetes tipo Pelton empleando el Proceso de Pases de Revenido, mismo que incluye los parámetros de soldadura, Gas de Aporte Argón 99%, en el primer pase rango de amperaje de 130 a 150 (A), Voltaje de soldadura en un intervalo de 11-13 (V), velocidad de avance 200-215 milímetros por minuto; así como la elección del material de aporte que consiste en el Electrodo 410 Ni Mo, de diámetro 2.4 mm.
- El Proceso de Soldadura de Pases de Revenido implica una recuperación de las propiedades mecánicas, sin embargo, el tiempo que conlleva es significativo, debido a que se trabaja con intervalos de temperaturas bajos, (no superiores a 120°C), por lo cual se debe esperar a que el material base retome esta temperatura antes de soldar. En los proceso de recuperación de rodets, es decir rellenos de fisuras utilizando material de aporte, puede ser eficaz debido a que se tienen varias zonas para soldar, y mientras se enfría una zona de un se puede realizar rellenar otra, pero para otras aplicaciones como estructurales podría llevar a un alto costo debido a la mano de obra y tiempo de ejecución.

RECOMENDACIONES

- Realizar los experimentos variando un parámetro a la vez, es decir solo intensidad de corriente en primer pase, o solo intensidad de corriente en segundo pase o a su vez solo velocidad de avance, para comprender cuál de las tres variables es la que prima en el proceso de distribución de calor.
- Realizar un análisis comparativo bajo mismas condiciones del proceso de soldadura por pases de revenido versus los procesos SMAW / GTAW/ GMAW, con la finalidad de obtener mayor información que pueda ser guía para el proceso de recuperación de rodets, minimizando costos.
- Realizar estadísticas del tiempo de vida de funcionamiento de un rodete, una vez se ha reparado con el Proceso de Soldadura de Pases de Revenido, comparando con los datos estadísticos históricos, para obtener indicadores de funcionamiento.
- Se recomienda la utilización de Software para el diseño de elementos finitos, ya que permite obtener parámetros de estudio en un menor tiempo, adicionalmente que permite evaluar muchas más propiedades mecánicas en un material.
- Desarrollar una investigación que involucre para poder calcular el cambio de la dureza en un material por influencia de la temperatura, en materiales inoxidable mediante el uso de Elementos Finitos, para poder predecir mediante Software la variación de esta propiedad mecánica en elementos a soldar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Y. Sun-sheng, K. Fan-yu, J. Wan-ming, and Q. Xiao-yun, “Computers & Fluids Effects of impeller trimming influencing pump as turbine,” *Comput. FLUIDS*, vol. 67, pp. 72–78, 2012.
- [2] F. E. Sierra Vargas, A. F. Sierra Alarcón, and C. A. Guerrero Fajardo, “Pequeñas y microcentrales hidroeléctricas: alternativa real de generación eléctrica,” *Inf. Técnico*, vol. 75, pp. 8–11, 2017.
- [3] J. C. Chávez, J. A. Valencia, G. A. Jaramillo, J. J. Coronado, and S. A. Rodríguez, “Failure analysis of a pelton impeller,” *Eng. Fail. Anal.*, 2014.
- [4] J. H. Kim, K. S. Na, G. G. Kim, C. S. Yoon, and S. J. Kim, “Effect of manganese on the cavitation erosion resistance of iron-chromium-carbon-silicon alloys for replacing cobalt-base Stellite,” *J. Nucl. Mater.*, vol. 352, no. 1–3, pp. 85–89, 2006.
- [5] A. S. Aloraier, S. Joshi, J. W. H. Price, and K. Alawadhi, “Hardness, microstructure, and residual stresses in low carbon steel welding with post-weld heat treatment and temper bead welding,” *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 45, no. 4, pp. 2030–2037, 2014.
- [6] J. Osorio, H. Pacheco, and A. Toro, “Microestructura del acero inoxidable grado ca6nm para la effect of pwht on the microstructure of ca6nm stainless steel for,” vol. 4, no. 36, pp. 901–906, 2007.
- [7] J. C. Baena, “Interdependencia entre las condiciones de operación y el desgaste en rodetes tipo pelton fabricados en acero ASTM A743 GRADO CA6NM,” no. July, 2015.
- [8] J. D. Escobar, R. Correa, J. F. Santa, J. E. Giraldo, and A. Toro, “iii international conference on welding and joining of materials evaluacion mecánica, tribológica y Microestructural de soldaduras de acero inoxidable martensítico

del tipo aWS A5.9 ER 410 NIMO,” pp. 1–10.

- [9] L. Yu, K. Saida, S. Hirano, N. Chigusa, M. Mochizuki, and K. Nishimoto, “Application of neural network-based hardness prediction method to HAZ of A533B steel produced by laser temper bead welding,” *Weld. World*, vol. 61, no. 3, pp. 483–498, 2017.
- [10] H. Murakami, S. Okano, M. Kameyama, T. Sera, and M. Mochizuki, “Numerical Model of Multi-pass Repair Process by Temper Bead Welding,” *Q. J. Japan Weld. Soc.*, vol. 31, no. 4, pp. 143s-147s, 2013.
- [11] J. Guerra-Álvarez, J. A. Pozo-Morejón, A. Cruz-Crespo, and J. V. Miguel-Oria, “Comportamiento De La Dureza En La Zona Afectada Térmicamente Durante Soldadura De Acero AISI 4130 Endurecido Mediante Tratamiento Térmico,” *Rev. Cent. Azúcar*, vol. 46, no. 1, pp. 10–17, 2019.
- [12] J. Auz, “Estudio del Tratamiento Térmico Post Soldadura del Acero Inoxidable Martensítico ASTM A743 grado CA6-NM y su incidencia en las Propiedades Mecánicas del Material aplicado a la Recuperación de Rodetes Hidráulicos,” *Repo.Uta.Edu.Ec*, no. 1, p. 130, 2011.
- [13] A. K. Rai, A. Kumar, and T. Staubli, “Effect of concentration and size of sediments on hydro-abrasive erosion of Pelton turbine,” *Renew. Energy*, 2019.
- [14] ARCONEL, “Información estadística agosto 2019,” pp. 8–13, 2019.
- [15] CIRT, “CELEC EP - Se Inauguró Centro De Investigación Y Recuperación De Turbinas Hidráulicas Y Partes Industriales - CirT,” 2018. [Online]. Available: <https://www.celec.gob.ec/78-quienes-somos/395-se-inauguro-centro-de-investigacion-y-recuperacion-de-turbinas-hidraulicas-y-partes-industriales-cirt.html>. [Accessed: 16-Nov-2019].
- [16] CIRT, “CIRT,” 2018. [Online]. Available: <https://www.celec.gob.ec/hidroagoyan/index.php/34-cirt>. [Accessed: 16-Nov-

2019].

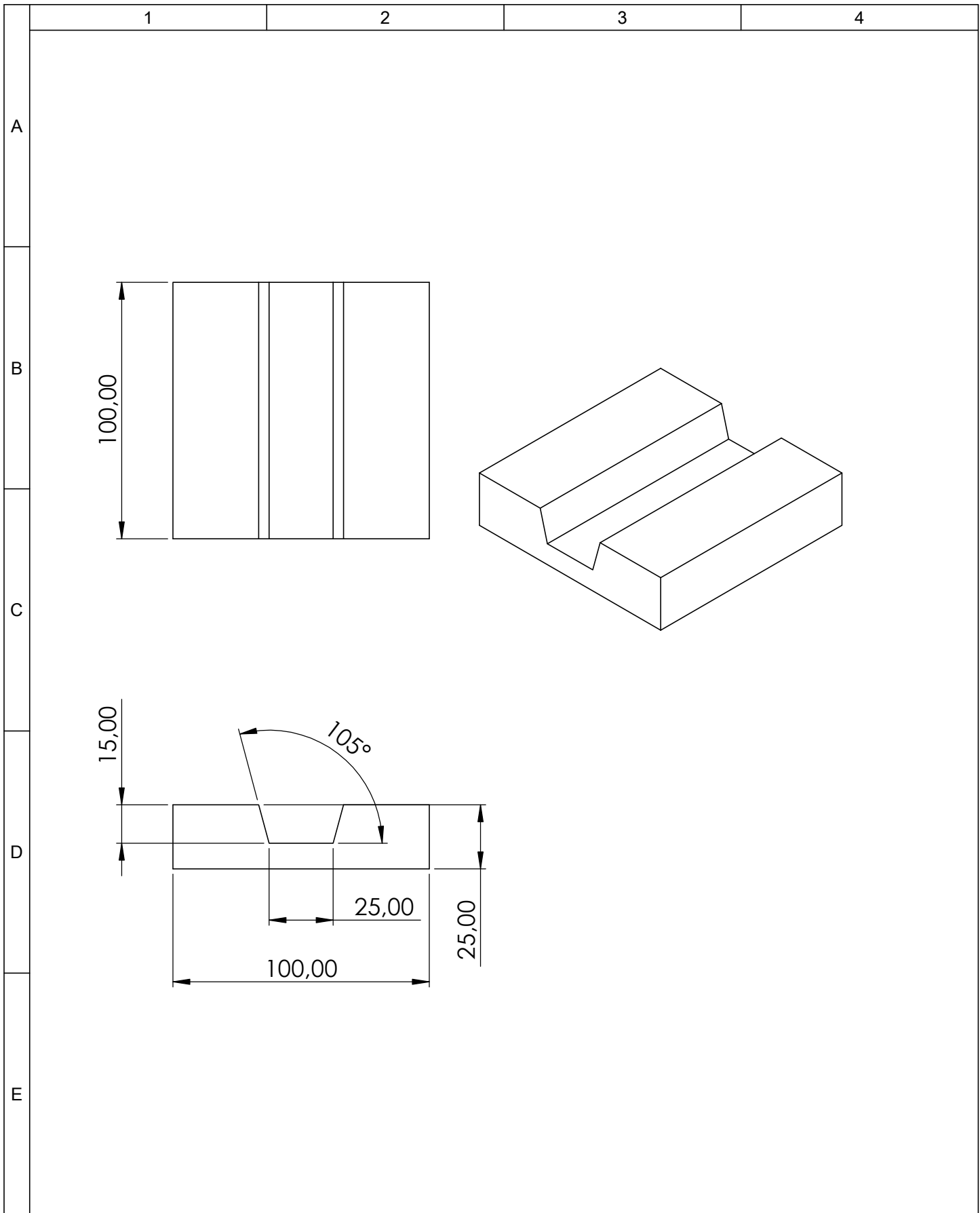
- [17] L. Hora, “\$12,5 millones de ahorro ha generado Centro de Recuperación de Turbinas Hidráulicas – La Nación,” 2019. [Online]. Available: <https://lanacion.com.ec/125-millones-de-ahorro-ha-generado-centro-de-recuperacion-de-turbinas-hidraulicas/>. [Accessed: 16-Nov-2019].
- [18] W. Callister and D. Rethwis, *Materials Science and Engineering an Introduction*, Eight. 2010.
- [19] W. Callister and Da. Rethwisch, *Fundamentals of Materilas Science and Engineering and Integrated Approach*, Third. United States, 2008.
- [20] A. International., “ASM Metals Handbook, Metallography and Microstructures. "Metallography and Microstructures of Stainless Steels and Maraging Steels," in 9, 10th ed., G. L. y E. M. George VANDER, Ed. Ohio, United States, 2004.
- [21] R. D. P. Silva, M. Ismenia, S. Toledo, L. Fernando, C. Briet, and C. A. Nunes, “Microstructure and Mechanical Properties of ASTM A743 CA6NM Steel Welded by FCAW Process 2 . Experimental Procedure,” vol. 20, no. 6, pp. 1622–1629, 2017.
- [22] *ASTM A 743 / A 743 M, Standard Specification for Castings , Iron-Chromium , Iron-Chromium-Nickel , Corrosion*, AMERICAN S., vol. 01. 2000.
- [23] F. Chuquimarca and H. Garces, “Estudio de la austenita retenida en el acero inoxidable bajo condiciones experimentales de soldadura y tratamientos térmicos,” ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO, 2020.
- [24] J. Rojas, “Identificación y cuantificación de fases en acero inoxidable ASTM A 743 Grado CA6NM mediante técnica de difracción de rayos x,” *Univ. Nac. Colomb.*, vol. 1, pp. 1–66, 2009.

- [25] L. Gámez, “Análisis de la soldabilidad de aceros inoxidable austeníticos unidos mediante el proceso gma aplicados a la fabricación de tanques de lixiviación,” Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, Saltillo, 2017.
- [26] M. Aracil, *Soldadura y Corte de los Aceros Inoxidables*. Madrid, España, 2020.
- [27] O. H. Rodríguez Pérez, *Metalurgia de la Soldadura*, 1°. Ciudad de la Habana, Cuba, 2013.
- [28] D. Stand and B. Sudarsanam, “Welding: Solidification and microstructure,” *Jom*, vol. 55, no. 6, pp. 14–20, 2003.
- [29] G. F. Vander Voort, “Metallography and Microstructures of Stainless Steels and Maraging Steels[1],” *Metallogr. Microstruct.*, no. January 2004, pp. 670–700, 2018.
- [30] Jürgen Ruge, “Handbuch der Schweißtechnik: Band I: Werkstoffe,” 1991. [Online]. Available: [https://books.google.com.ec/books?id=5KLwBgAAQBAJ&pg=PA323&lpg=PA323&dq=Brezina,+P.:+Martensitische+Chrom-Nickel-Stahle+mit+tiefem+Kohlenstoffgehalt&source=bl&ots=8vALxbHR-j&sig=ACfU3U0xHWkAJIs-XUHdX9EtzVpE-rn5aQ&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwjqrBKnLwAhUKZd8KHRzpDEAQ6AEwEXoECAYQAw#v=onepage&q=Brezina%2C P.%3A Martensitische Chrom-Nickel-Stahle mit tiefem Kohlenstoffgehalt&f=false](https://books.google.com.ec/books?id=5KLwBgAAQBAJ&pg=PA323&lpg=PA323&dq=Brezina,+P.:+Martensitische+Chrom-Nickel-Stahle+mit+tiefem+Kohlenstoffgehalt&source=bl&ots=8vALxbHR-j&sig=ACfU3U0xHWkAJIs-XUHdX9EtzVpE-rn5aQ&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwjqrBKnLwAhUKZd8KHRzpDEAQ6AEwEXoECAYQAw#v=onepage&q=Brezina%2C%20P.%3A%20Martensitische%20Chrom-Nickel-Stahle%20mit%20tiefem%20Kohlenstoffgehalt&f=false). [Accessed: 24-May-2021].
- [31] R. Timings, *Fabrication and Welding Engineering*. USA, 2008.
- [32] L. Yu *et al.*, “Neural Network Prediction of Hardness in HAZ of Temper Bead Welding Using the Proposed Thermal Cycle Tempering Parameter (TCTP),” *ISIJ Int.*, vol. 51, no. 9, pp. 1506–1515, 2011.

- [33] C. A. Valencia, “Efecto del amperaje en la microestructura de la zona afectado por el calor,” pp. 1–75, 2016.
- [34] S. S. W. Problems, “Welding Stainless Steel — Questions and Answers.”
- [35] C. CAÑIZARES and J. QUINCHUELA, “Tecnologías Para La Recuperación Por Soldadura De Álabes De Turbinas Hidráulicas Construidas De Acero Inoxidable Martensítico ASTM A743 CA-6NM (UNS J91540),” *Esc. POLITÉCNICA CHIMBORAZO*, 2017.
- [36] A. S. Oddy and J. M. J. McDill, “Numerical prediction of microstructure and hardness in multicycle simulations,” *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 5, no. 3, pp. 365–372, 1996.
- [37] J. M. Guilemany and J. G. De Salazar, “Influencia de la Temperatura en la Microestructura y Propiedades de un Recubrimiento de Al-12Si Obtenido por Proyección Fría (CGS),” no. May, 2019.
- [38] V. A. Karkhin, *Thermal Processes in Welding*, vol. 14, no. 12. 2019.
- [39] J. W. Westwater and H. G. Drickamer, “The Mathematics of Diffusion,” *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 79, no. 5, pp. 1267–1268, 1957.
- [40] M. Khurshid, “Static and fatigue analyses of welded steel structures – some aspects towards lightweight design Mansoor Khurshid,” KTH-Royal Institute of Technology, 2017.
- [41] H. Cerjak and K. Easterling, *Mathematical Modelling of Weld Phenomena*, vol. 9, no. 2. London, 1993.
- [42] V. A. Karkhin *et al.*, “Effects of latent heat of fusion on thermal processes in laser welding of aluminium alloys,” *Sci. Technol. Weld. Join.*, vol. 10, no. 5, pp. 597–603, 2005.

- [43] M. N. Brykov *et al.*, “Microstructure and properties of heat affected zone in high-carbon steel after welding with fast cooling in water,” *Materials (Basel)*., vol. 13, no. 22, pp. 1–13, 2020.
- [44] K. Ciechacki and T. Szykowny, “The effect of a welding method on the structure of a welded joint,” *Polish CIMAC*, vol. 16, pp. 2–7, 2016.
- [45] L. Cedex, V. Robin, D. Pont, and S. Courtin, “Pvp2011-57596 Process : Application To Dissimilar Metal Welds,” pp. 1–8, 2011.
- [46] S. Vignier, E. Biro, and M. Hervé, “Predicting the hardness profile across resistance spot welds in martensitic steels,” *Weld. World*, vol. 58, no. 3, pp. 297–305, 2014.
- [47] E. Folkhard, *Welding Metallurgy of Stainless Steels*. .
- [48] R. Alberto and S. Turcios, “t-Student. Usos y abusos,” pp. 59–61, 2015.
- [49] “Connecting The Codes From Temper Bead Welding To The ASME CODES, CSA codes and the NBIC,” *CASTI*, vol. 7, no. 165, p. 124, 2004.

ANEXOS



				Unidades mm	(Peso)	Materiales:	
				Tolerancia $\pm 0,1$			
				Fecha	Nombre	Denominación: PROBETA TEMPERED BEAD	Escala: 1:2
				Dibujó: 8/7/2020	Ambar Y.		
				Revisó: 8/7/2020	Marco Z.		
				Aprobó: 8/7/2020	Marco Z.		
						Código:	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			Cliente:	

ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

Welding Procedure Specifications (WPS)
QW-482 WELDING PROCEDURE SPECIFICATIONS.
ASME, Section IX - Boiler and Pressure Vessel Code.

Ciente: Ing. Ambar Yépez **WPS N°:** CIRT/21-WPS-TB001 **Revisión:** A **Fecha:** 3/5/2021
Proyecto: SOLDADURA PASES DE REVENIDO **PQR de apoyo:** N/A **Pág. 1 de 2**

Proceso(s) de soldadura: GMAW / GTAW **Tipo (s):** MANUAL / MANUAL
(Automático, Semi-automático, Manual, Con máquina)

JUNTAS (QW-402) ESQUEMA TIPO (sketch):

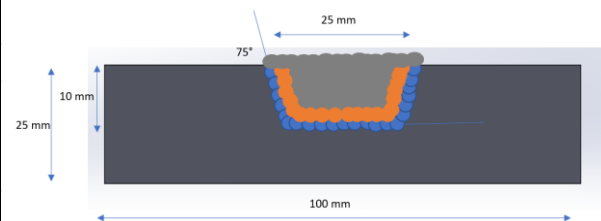
Diseño de Junta Superficie regular plana; relleno con capa final vista

Respaldo SI NO

Tipo de material de respaldo
 Metálico No metálico Metal no fundible Otro

Preparación de la junta Ver detalle de la junta

Método de preparación y limpieza Cepillado



*METALES BASE (QW-403)

N° P 6 **N° de Grupo** 4 **a** **N° P** 6 **N° de Grupo** 4

ó

Especif. material ASTM A743 **Tipo/grado o N° UNS** CA-6MN (J91540)
hasta **Especif. material** ASTM A743 **Tipo/grado o N° UNS** CA-6MN (J91540)

ó

	%C	%Cr	%Ni	%Mo	%Si	%Mn	%Fe
Análisis Químico y Prop. Mecánicas	< 0,06	11,5-14	3,5-4,5	0,4-1	< 1	< 1	78,4-84,6
hasta Análisis Químico y Prop. Mecánicas	< 0,06	11,5-14	3,5-4,5	0,4-1	< 1	< 1	78,4-84,6

Rango de Espesores:

Metal Base Calificado (mm) **Ranura:** 12 **Filete:** N/A

Metal de relleno. Espesor máximo de pase ≤ 3 mm SI NO **Dimension:** ancho 5-7 mm



Otra información: _____

*METALES DE APORTE (QW-404)

	GTAW R+H	GMAW F1+F2	GTAW Fn+1
N° Espec. (SFA)	5.9	5.9	5.9
N° AWS (Clase)	ER410NiMo	ER410NiMo	ER410NiMo
N° F	6	6	6
N° A	-	-	-
Tamaño de Metales de Aporte	2,4 mm	2,4 mm	2,4 mm
Metales de Soldadura			
Rango de Espesor depositado:			
Ranura	15 x 25 x 100 mm	15 x 25 x 100 mm	15 x 25 x 100 mm
Filete	NA	NA	NA
Hardfacing			
Fundente del Aporte (clase)	NA	NA	NA
Nombre Comercial del Aporte	SELECTARC TIG M13/4	SELECTARC TIG M13/4	SELECTARC TIG M13/4
Inserto consumible			
Otra información:			

* Otra combinación de metal base y metal de aporte se deberá registrar individualmente.

ELABORADO POR:	REVISADO POR:	APROBADO POR:
Nombre: <u> Ing. Ambar Yépez </u>	Nombre: <u> Ing. Marco Zabala </u>	Nombre: <u> Ing. Julio Chonata </u>
AUTOR DEL PROYECTO	JEFE DE MANUFACTURA Y RECUPERACIÓN	ESPECIALISTA TLG MATERIALES Y SOLDADURA

		ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA <i>Welding Procedure Specifications (WPS)</i> QW-482 (RESPALDO). ASME, Section IX - Boiler and Pressure Vessel Code.																												
WPS N°: CIRT/21-WPS-TB001 Fecha: 3/5/2021			PQR de apoyo: N/A Revisión: A			Pág. 2 de 2																								
POSICIONES (QW-405)			TRATAMIENTO TÉRMICO POSTERIOR A LA SOLD. (QW-407)																											
Posición (es) de Ranura 1G Progresión de Sold. P. Arriba N/A P. Abajo N/A Posición (es) de Filete N/A Otro			Rango de temperaturas NA Intervalo de tiempos NA Otro NA																											
PRECALENTAMIENTO (QW-406)			GAS (QW-408)																											
Temp. Prealent. Mín. 80°C Temp. Entre Pases Máx. 120°C Mantenimiento de Precal. NA Otro NA			<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th colspan="3">Porcentaje de la composición</th> </tr> <tr> <th>Gas(es)</th> <th>Mezcla</th> <th>Caudal (SCFH)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Protección</td> <td>Ar 4,8</td> <td>100%</td> <td>30-40</td> </tr> <tr> <td>Gas purga</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Respaldo</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Otros</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>						Porcentaje de la composición			Gas(es)	Mezcla	Caudal (SCFH)	Protección	Ar 4,8	100%	30-40	Gas purga				Respaldo				Otros			
	Porcentaje de la composición																													
	Gas(es)	Mezcla	Caudal (SCFH)																											
Protección	Ar 4,8	100%	30-40																											
Gas purga																														
Respaldo																														
Otros																														
CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS (QW-409)																														
Corriente AC o DC DC		Polaridad																												
Amps (Rango) 160 A		Directa x																												
Volts (Rango) 11 V		Invertida																												
Tamaño y Tipo de electrodo de Tungsteno		1-3																												
Modo de Transfer. Metal para GMAW		N/A																												
Rango Veloc. Alimentación Electrodo de Alambre		N/A																												
TÉCNICA (QW-410)																														
Cordón Long. O Cordón de Vaivén		Longitudinal																												
Tamaño Orificio o de Taza de Gas		6-8																												
Limp. Inicial y Entre Pasos (Cep., Esm., etc.)		Cepillado																												
Método de blanqueado Posterior		Disco de Desbaste																												
Oscilación		NA																												
Distancia de Tubo de Contacto a Superficie de Trabajo		10-15 mm																												
Paso Múltiple o Simple (por Lado)		Múltiple																												
Electrodos: Múltiples o Simple		Simple																												
Velocidad de avance (Rango)		150 mm/min																												
Martillado		NA/																												
Otra Información																														
Tabla para el registro de parámetros de soldadura. Referencia (QW-409)																														
Capa(s) de Soldadura	Proceso	Metal de Aporte		Corriente		Rango de Voltaje	Rango de Veloc. de Recorrido	Otros (p. ej., Notas, Comentarios, Adición de Alambre, Caliente, Técnica, Ángulo de Soplete, ect.)																						
		Clase	Diámetro	Tipo de Polaridad	Rango Amperaje																									
Raíz	GTAW	ER410NiMo	2,4 mm	DCEN	160-180	10-13	150mm/min																							
Relleno	GTAW	ER410NiMo	2,4 mm	DCEN	160-180	10-13	150 mm/min																							
Capa final	GTAW	ER410NiMo	2,4 mm	DCEN	160-180	10-13	150 mm/min																							
REGISTRADO POR:		REVISADO POR:			APROBADO POR:																									
ELABORADO POR:		REVISADO POR:			APROBADO POR:																									
Nombre: Ing. Ambar Yépez		Nombre: Adem Tartic			Nombre: Ing. Julio Chonata																									
AUTOR DEL PROYECTO		TECNICO ESPECIALISTA EXTRANJERO			ESPECIALISTA TLG MATERIALES Y SOLDADURA																									

ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

Welding Procedure Specifications (WPS)
QW-482 WELDING PROCEDURE SPECIFICATIONS.
ASME, Section IX - Boiler and Pressure Vessel Code.

Ciente: Ing. Ambar Yépez **WPS N°:** CIRT/21-WPS-TB002 **Revisión:** A **Fecha:** 3/5/2021
Proyecto: SOLDADURA PASES DE REVENIDO **PQR de apoyo:** N/A **Pág. 1 de 2**

Proceso(s) de soldadura: GMAW / GTAW **Tipo (s):** MANUAL / MANUAL
(Automático, Semi-automático, Manual, Con máquina)

JUNTAS (QW-402) **ESQUEMA TIPO (sketch):**

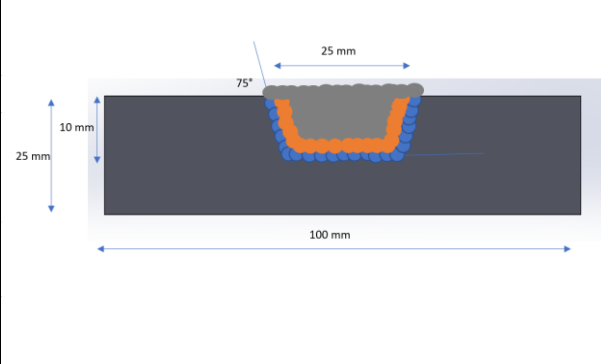
Diseño de Junta Superficie regular plana; relleno con capa final vista

Respaldo SI NO

Tipo de material de respaldo
 Metálico No metálico Metal no fundible Otro

Preparación de la junta Ver detalle de la junta

Método de preparación y limpieza Cepillado



***METALES BASE (QW-403)**

N° P 6 **N° de Grupo** 4 **a** **N° P** 6 **N° de Grupo** 4

ó

Especif. material ASTM A743 **Tipo/grado o N° UNS** CA-6MN (J91540)
hasta **Especif. material** ASTM A743 **Tipo/grado o N° UNS** CA-6MN (J91540)

ó

Análisis Químico y Prop. Mecánicas		%C	%Cr	%Ni	%Mo	%Si	%Mn	%Fe
		< 0,06	11,5-14	3,5-4,5	0,4-1	< 1	< 1	78,4-84,6

hasta | **Análisis Químico y Prop. Mecánicas**

Análisis Químico y Prop. Mecánicas		%C	%Cr	%Ni	%Mo	%Si	%Mn	%Fe
		< 0,06	11,5-14	3,5-4,5	0,4-1	< 1	< 1	78,4-84,6

Rango de Espesores:

Metal Base Calificado (mm) **Ranura:** 12 **Filete:** N/A

Metal de relleno. Espesor máximo de pase ≤ 3 mm SI NO **Dimension:** ancho 5-7 mm



Otra información: _____

***METALES DE APORTE (QW-404)**

	GTAW R+H	GMAW F1+F2	GTAW Fn+1
N° Espec. (SFA)	5.9	5.9	5.9
N° AWS (Clase)	ER410NiMo	ER410NiMo	ER410NiMo
N° F	6	6	6
N° A	-	-	-
Tamaño de Metales de Aporte	2,4 mm	2,4 mm	2,4 mm
Metales de Soldadura			
Rango de Espesor depositado:			
Ranura	15 x 25 x 100 mm	15 x 25 x 100 mm	15 x 25 x 100 mm
Filete	NA	NA	NA
Hardfacing			
Fundente del Aporte (clase)	NA	NA	NA
Nombre Comercial del Aporte	SELECTARC TIG M13/4	SELECTARC TIG M13/4	SELECTARC TIG M13/4
Inserto consumible			
Otra información: _____			

* Otra combinación de metal base y metal de aporte se deberá registrar individualmente.

ELABORADO POR:	REVISADO POR:	APROBADO POR:
Nombre: <u> Ing. Ambar Yépez </u>	Nombre: <u> Ing. Marco Zabala </u>	Nombre: <u> Ing. Julio Chonata </u>
AUTOR DEL PROYECTO	JEFE DE MANUFACTURA Y RECUPERACIÓN	ESPECIALISTA TLG MATERIALES Y SOLDADURA

		ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA <i>Welding Procedure Specifications (WPS)</i> QW-482 (RESPALDO). ASME, Section IX - Boiler and Pressure Vessel Code.																												
WPS N°: CIRT/21-WPS-TB002 Fecha: 3/5/2021			PQR de apoyo: N/A Revisión: A			Pág. 2 de 2																								
POSICIONES (QW-405)			TRATAMIENTO TÉRMICO POSTERIOR A LA SOLD. (QW-407)																											
Posición (es) de Ranura 1G Progresión de Sold. P. Arriba N/A P. Abajo N/A Posición (es) de Filete N/A Otro			Rango de temperaturas NA Intervalo de tiempos NA Otro NA																											
PRECALENTAMIENTO (QW-406)			GAS (QW-408)																											
Temp. Prealent. Mín. 80°C Temp. Entre Pases Máx. 120°C Mantenimiento de Precal. NA Otro NA			<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th colspan="3">Porcentaje de la composición</th> </tr> <tr> <th>Gas(es)</th> <th>Mezcla</th> <th>Caudal (SCFH)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Protección</td> <td>Ar 4,8</td> <td>100%</td> <td>30-40</td> </tr> <tr> <td>Gas purga</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Respaldo</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Otros</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>						Porcentaje de la composición			Gas(es)	Mezcla	Caudal (SCFH)	Protección	Ar 4,8	100%	30-40	Gas purga				Respaldo				Otros			
	Porcentaje de la composición																													
	Gas(es)	Mezcla	Caudal (SCFH)																											
Protección	Ar 4,8	100%	30-40																											
Gas purga																														
Respaldo																														
Otros																														
CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS (QW-409)																														
Corriente AC o DC DC		Polaridad																												
Amps (Rango) 160 A		Directa x																												
Volts (Rango) 11 V		Invertida																												
Tamaño y Tipo de electrodo de Tungsteno		1-3																												
Modo de Transfer. Metal para GMAW		N/A																												
Rango Veloc. Alimentación Electrodo de Alambre		N/A																												
TÉCNICA (QW-410)																														
Cordón Long. O Cordón de Vaivén		Longitudinal																												
Tamaño Orificio o de Taza de Gas		6-8																												
Limp. Inicial y Entre Pasos (Cep., Esm., etc.)		Cepillado																												
Método de blanqueado Posterior		Disco de Desbaste																												
Oscilación		NA																												
Distancia de Tubo de Contacto a Superficie de Trabajo		10-15 mm																												
Paso Múltiple o Simple (por Lado)		Múltiple																												
Electrodos: Múltiples o Simple		Simple																												
Velocidad de avance (Rango)		150 mm/min																												
Martillado		NA/																												
Otra Información																														
Tabla para el registro de parámetros de soldadura. Referencia (QW-409)																														
Capa(s) de Soldadura	Proceso	Metal de Aporte		Corriente		Rango de Voltaje	Rango de Veloc. de Recorrido	Otros (p. ej., Notas, Comentarios, Adición de Alambre, Caliente, Técnica, Ángulo de Soplete, ect.)																						
		Clase	Diámetro	Tipo de Polaridad	Rango Amperaje																									
Raíz	GTAW	ER410NiMo	2,4 mm	DCEN	160-180	10-13	150 mm/min																							
Relleno	GTAW	ER410NiMo	2,4 mm	DCEN	200-220	10-13	150 mm/min																							
Capa final	GTAW	ER410NiMo	2,4 mm	DCEN	200-220	10-13	150 mm/min																							
REGISTRADO POR:		REVISADO POR:			APROBADO POR:																									
ELABORADO POR:		REVISADO POR:			APROBADO POR:																									
Nombre: Ing. Ambar Yépez		Nombre: Adem Tartic			Nombre: Ing. Julio Chonata																									
AUTOR DEL PROYECTO		TECNICO ESPECIALISTA EXTRANJERO			ESPECIALISTA TLG MATERIALES Y SOLDADURA																									

ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

Welding Procedure Specifications (WPS)
QW-482 WELDING PROCEDURE SPECIFICATIONS.
ASME, Section IX - Boiler and Pressure Vessel Code.

Ciente: Ing. Ambar Yépez **WPS N°:** CIRT/21-WPS-TB003 **Revisión:** A **Fecha:** 3/5/2021
Proyecto: SOLDADURA PASES DE REVENIDO **PQR de apoyo:** N/A **Pág. 1 de 2**

Proceso(s) de soldadura: GMAW / GTAW **Tipo (s):** MANUAL / MANUAL
(Automático, Semi-automático, Manual, Con máquina)

JUNTAS (QW-402) **ESQUEMA TIPO (sketch):**

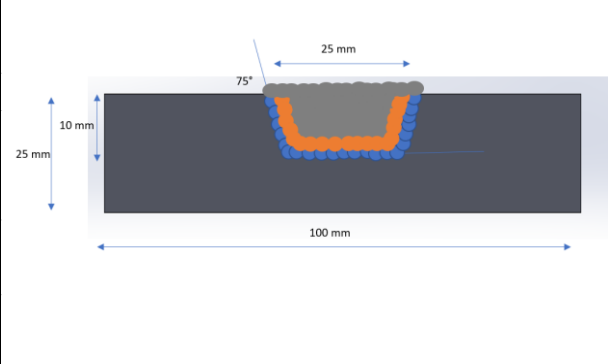
Diseño de Junta Superficie regular plana; relleno con capa final vista

Respaldo SI NO

Tipo de material de respaldo
 Metálico No metálico Metal no fundible Otro

Preparación de la junta Ver detalle de la junta

Método de preparación y limpieza Cepillado



***METALES BASE (QW-403)**

N° P 6 **N° de Grupo** 4 **a** **N° P** 6 **N° de Grupo** 4

ó

Especif. material ASTM A743 **Tipo/grado o N° UNS** CA-6MN (J91540)
hasta **Especif. material** ASTM A743 **Tipo/grado o N° UNS** CA-6MN (J91540)

ó

Análisis Químico y Prop. Mecánicas

	%C	%Cr	%Ni	%Mo	%Si	%Mn	%Fe
	< 0,06	11,5-14	3,5-4,5	0,4-1	< 1	< 1	78,4-84,6

hasta | **Análisis Químico y Prop. Mecánicas**

	%C	%Cr	%Ni	%Mo	%Si	%Mn	%Fe
	< 0,06	11,5-14	3,5-4,5	0,4-1	< 1	< 1	78,4-84,6

Rango de Espesores:

Metal Base Calificado (mm) **Ranura:** 12 **Filete:** N/A

Metal de relleno. Espesor máximo de pase ≤ 3 mm SI NO **Dimension:** ancho 5-7 mm



Otra información: _____

***METALES DE APORTE (QW-404)**

	GTAW R+H	GMAW F1+F2	GTAW Fn+1
N° Espec. (SFA)	5.9	5.9	5.9
N° AWS (Clase)	ER410NiMo	ER410NiMo	ER410NiMo
N° F	6	6	6
N° A	-	-	-
Tamaño de Metales de Aporte	2,4 mm	2,4 mm	2,4 mm
Metales de Soldadura			
Rango de Espesor depositado:			
Ranura	15 x 25 x 100 mm	15 x 25 x 100 mm	15 x 25 x 100 mm
Filete	NA	NA	NA
Hardfacing			
Fundente del Aporte (clase)	NA	NA	NA
Nombre Comercial del Aporte	SELECTARC TIG M13/4	SELECTARC TIG M13/4	SELECTARC TIG M13/4
Inserto consumible			
Otra información:	_____		

* Otra combinación de metal base y metal de aporte se deberá registrar individualmente.

ELABORADO POR:	REVISADO POR:	APROBADO POR:
Nombre: <u> Ing. Ambar Yépez </u>	Nombre: <u> Ing. Marco Zabala </u>	Nombre: <u> Ing. Julio Chonata </u>
AUTOR DEL PROYECTO	JEFE DE MANUFACTURA Y RECUPERACIÓN	ESPECIALISTA TLG MATERIALES Y SOLDADURA

		ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA <i>Welding Procedure Specifications (WPS)</i> QW-482 (RESPALDO). ASME, Section IX - Boiler and Pressure Vessel Code.																												
WPS N°: CIRT/21-WPS-TB003 Fecha: 3/5/2021			PQR de apoyo: N/A Revisión: A			Pág. 2 de 2																								
POSICIONES (QW-405)			TRATAMIENTO TÉRMICO POSTERIOR A LA SOLD. (QW-407)																											
Posición (es) de Ranura 1G Progresión de Sold. P. Arriba N/A P. Abajo N/A Posición (es) de Filete N/A Otro			Rango de temperaturas NA Intervalo de tiempos NA Otro NA																											
PRECALENTAMIENTO (QW-406)			GAS (QW-408)																											
Temp. Prealent. Mín. 80°C Temp. Entre Pases Máx. 120°C Mantenimiento de Precal. NA Otro NA			<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th colspan="3">Porcentaje de la composición</th> </tr> <tr> <th>Gas(es)</th> <th>Mezcla</th> <th>Caudal (SCFH)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Protección</td> <td>Ar 4,8</td> <td>100%</td> <td>30-40</td> </tr> <tr> <td>Gas purga</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Respaldo</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Otros</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>						Porcentaje de la composición			Gas(es)	Mezcla	Caudal (SCFH)	Protección	Ar 4,8	100%	30-40	Gas purga				Respaldo				Otros			
	Porcentaje de la composición																													
	Gas(es)	Mezcla	Caudal (SCFH)																											
Protección	Ar 4,8	100%	30-40																											
Gas purga																														
Respaldo																														
Otros																														
CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS (QW-409)																														
Corriente AC o DC DC		Polaridad																												
Amps (Rango) 160 A		Directa x																												
Volts (Rango) 11 V		Invertida																												
Tamaño y Tipo de electrodo de Tungsteno		1-3																												
Modo de Transfer. Metal para GMAW		N/A																												
Rango Veloc. Alimentación Electrodo de Alambre		N/A																												
TÉCNICA (QW-410)																														
Cordón Long. O Cordón de Vaivén		Longitudinal																												
Tamaño Orificio o de Taza de Gas		6-8																												
Limp. Inicial y Entre Pasos (Cep., Esm., etc.)		Cepillado																												
Método de blanqueado Posterior		Disco de Desbaste																												
Oscilación		NA																												
Distancia de Tubo de Contacto a Superficie de Trabajo		10-15 mm																												
Paso Múltiple o Simple (por Lado)		Múltiple																												
Electrodos: Múltiples o Simple		Simple																												
Velocidad de avance (Rango)		200 mm/min																												
Martillado		NA/																												
Otra Información																														
Tabla para el registro de parámetros de soldadura. Referencia (QW-409)																														
Capa(s) de Soldadura	Proceso	Metal de Aporte		Corriente		Rango de Voltaje	Rango de Veloc. de Recorrido	Otros (p. ej., Notas, Comentarios, Adición de Alambre, Caliente, Técnica, Ángulo de Soplete, ect.)																						
		Clase	Diámetro	Tipo de Polaridad	Rango Amperaje																									
Raíz	GTAW	ER410NiMo	2,4 mm	DCEN	160-180	10-13	200mm/min																							
Relleno	GTAW	ER410NiMo	2,4 mm	DCEN	160-180	10-13	200 mm/min																							
Capa final	GTAW	ER410NiMo	2,4 mm	DCEN	160-180	10-13	2000 mm/min																							
REGISTRADO POR:		REVISADO POR:			APROBADO POR:																									
ELABORADO POR:		REVISADO POR:			APROBADO POR:																									
Nombre: Ing. Ambar Yépez		Nombre: Adem Tartic			Nombre: Ing. Julio Chonata																									
AUTOR DEL PROYECTO		TECNICO ESPECIALISTA EXTRANJERO			ESPECIALISTA TLG MATERIALES Y SOLDADURA																									

ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

Welding Procedure Specifications (WPS)
QW-482 WELDING PROCEDURE SPECIFICATIONS.
ASME, Section IX - Boiler and Pressure Vessel Code.

Ciente: Ing. Ambar Yépez **WPS N°:** CIRT/21-WPS-TB004 **Revisión:** A **Fecha:** 3/5/2021
Proyecto: SOLDADURA PASES DE REVENIDO **PQR de apoyo:** N/A **Pág. 1 de 2**

Proceso(s) de soldadura: GMAW / GTAW **Tipo (s):** MANUAL / MANUAL
(Automático, Semi-automático, Manual, Con máquina)

JUNTAS (QW-402) **ESQUEMA TIPO (sketch):**

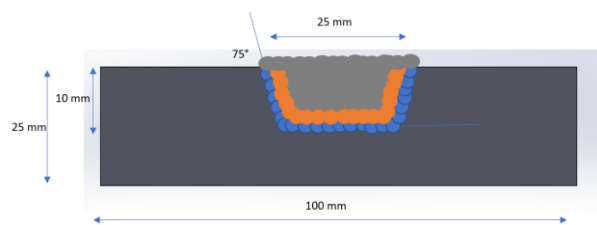
Diseño de Junta Superficie regular plana; relleno con capa final vista

Respaldo SI NO

Tipo de material de respaldo
 Metálico No metálico Metal no fundible Otro

Preparación de la junta Ver detalle de la junta

Método de preparación y limpieza Cepillado



***METALES BASE (QW-403)**

N° P 6 **N° de Grupo** 4 **a** **N° P** 6 **N° de Grupo** 4

ó

Especif. material ASTM A743 **Tipo/grado o N° UNS** CA-6MN (J91540)
hasta **Especif. material** ASTM A743 **Tipo/grado o N° UNS** CA-6MN (J91540)

ó

Análisis Químico y Prop. Mecánicas		%C	%Cr	%Ni	%Mo	%Si	%Mn	%Fe
		< 0,06	11,5-14	3,5-4,5	0,4-1	< 1	< 1	78,4-84,6

hasta | **Análisis Químico y Prop. Mecánicas**

Análisis Químico y Prop. Mecánicas		%C	%Cr	%Ni	%Mo	%Si	%Mn	%Fe
		< 0,06	11,5-14	3,5-4,5	0,4-1	< 1	< 1	78,4-84,6

Rango de Espesores:

Metal Base Calificado (mm) **Ranura:** 12 **Filete:** N/A

Metal de relleno. Espesor máximo de pase ≤ 3 mm SI NO **Dimension:** ancho 5-7 mm



Otra información: _____

***METALES DE APORTE (QW-404)**

	GTAW R+H	GMAW F1+F2	GTAW Fn+1
N° Espec. (SFA)	5.9	5.9	5.9
N° AWS (Clase)	ER410NiMo	ER410NiMo	ER410NiMo
N° F	6	6	6
N° A	-	-	-
Tamaño de Metales de Aporte	2,4 mm	2,4 mm	2,4 mm
Metales de Soldadura			
Rango de Espesor depositado:			
Ranura	15 x 25 x 100 mm	15 x 25 x 100 mm	15 x 25 x 100 mm
Filete	NA	NA	NA
Hardfacing			
Fundente del Aporte (clase)	NA	NA	NA
Nombre Comercial del Aporte	SELECTARC TIG M13/4	SELECTARC TIG M13/4	SELECTARC TIG M13/4
Inserto consumible			
Otra información: _____			

* Otra combinación de metal base y metal de aporte se deberá registrar individualmente.

ELABORADO POR:	REVISADO POR:	APROBADO POR:
Nombre: <u> Ing. Ambar Yépez </u>	Nombre: <u> Ing. Marco Zabala </u>	Nombre: <u> Ing. Julio Chonata </u>
AUTOR DEL PROYECTO	JEFE DE MANUFACTURA Y RECUPERACIÓN	ESPECIALISTA TLG MATERIALES Y SOLDADURA

		ESPECIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA <i>Welding Procedure Specifications (WPS)</i> QW-482 (RESPALDO). ASME, Section IX - Boiler and Pressure Vessel Code.																												
WPS N°: CIRT/21-WPS-TB004 Fecha: 3/5/2021			PQR de apoyo: N/A Revisión: A			Pág. 2 de 2																								
POSICIONES (QW-405)			TRATAMIENTO TÉRMICO POSTERIOR A LA SOLD. (QW-407)																											
Posición (es) de Ranura 1G Progresión de Sold. P. Arriba N/A P. Abajo N/A Posición (es) de Filete N/A Otro			Rango de temperaturas NA Intervalo de tiempos NA Otro NA																											
PRECALENTAMIENTO (QW-406)			GAS (QW-408)																											
Temp. Prealent. Mín. 80°C Temp. Entre Pases Máx. 120°C Mantenimiento de Precal. NA Otro NA			<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th colspan="3">Porcentaje de la composición</th> </tr> <tr> <th>Gas(es)</th> <th>Mezcla</th> <th>Caudal (SCFH)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Protección</td> <td>Ar 4,8</td> <td>100%</td> <td>30-40</td> </tr> <tr> <td>Gas purga</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Respaldo</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Otros</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>						Porcentaje de la composición			Gas(es)	Mezcla	Caudal (SCFH)	Protección	Ar 4,8	100%	30-40	Gas purga				Respaldo				Otros			
	Porcentaje de la composición																													
	Gas(es)	Mezcla	Caudal (SCFH)																											
Protección	Ar 4,8	100%	30-40																											
Gas purga																														
Respaldo																														
Otros																														
CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS (QW-409)																														
Corriente AC o DC DC		Polaridad																												
Amps (Rango) 160 A		Directa x																												
Volts (Rango) 11 V		Invertida																												
Tamaño y Tipo de electrodo de Tungsteno		1-3																												
Modo de Transfer. Metal para GMAW		N/A																												
Rango Veloc. Alimentación Electrodo de Alambre		N/A																												
TÉCNICA (QW-410)																														
Cordón Long. O Cordón de Vaivén		Longitudinal																												
Tamaño Orificio o de Taza de Gas		6-8																												
Limp. Inicial y Entre Pasos (Cep., Esm., etc.)		Cepillado																												
Método de blanqueado Posterior		Disco de Desbaste																												
Oscilación		NA																												
Distancia de Tubo de Contacto a Superficie de Trabajo		10-15 mm																												
Paso Múltiple o Simple (por Lado)		Múltiple																												
Electrodos: Múltiples o Simple		Simple																												
Velocidad de avance (Rango)		200 mm/min																												
Martillado		NA/																												
Otra Información																														
Tabla para el registro de parámetros de soldadura. Referencia (QW-409)																														
Capa(s) de Soldadura	Proceso	Metal de Aporte		Corriente		Rango de Voltaje	Rango de Veloc. de Recorrido	Otros (p. ej., Notas, Comentarios, Adición de Alambre, Caliente, Técnica, Ángulo de Soplete, ect.)																						
		Clase	Diámetro	Tipo de Polaridad	Rango Amperaje																									
Raíz	GTAW	ER410NiMo	2,4 mm	DCEN	160-180	10-13	200 mm/min																							
Relleno	GTAW	ER410NiMo	2,4 mm	DCEN	200-220	10-13	200 mm/min																							
Capa final	GTAW	ER410NiMo	2,4 mm	DCEN	200-220	10-13	200 mm/min																							
REGISTRADO POR:		REVISADO POR:			APROBADO POR:																									
ELABORADO POR:		REVISADO POR:			APROBADO POR:																									
Nombre: Ing. Ambar Yépez		Nombre: Adem Tartic			Nombre: Ing. Julio Chonata																									
AUTOR DEL PROYECTO		TECNICO ESPECIALISTA EXTRANJERO			ESPECIALISTA TLG MATERIALES Y SOLDADURA																									



PLAN DE INSPECCIÓN Y PRUEBAS REPORTE DE INSPECCIÓN VISUAL

Visual Testing

Reg. No.: ETT-REG-CC01 Revisión: 1 Hoja: 1 de 3
Fecha: 28/05/2021



EQUIPO/PIEZA: Placas de soldadura de recuperación **CANTIDAD:** 12
MATERIAL: Acero Inoxidable ASTM A743 CA6-NM **PESO UNITARIO:** 0.25 Kg
DIMENSIONES: 100 x 100 mm. **PLAN DE CALIDAD No.:** -
ESPEJOR: 25 mm. **PLANO DE REFERENCIA:** TTPS-04, TTPS-05
No. SERIE: P01 P02 P03 P04 **PROCEDIMIENTO:** ETT-PRO-CC-01

ESTADO/FASE: Fundición Soldadura Mecanizado Antes de TT Después de TT Sin TT

PROTOCOLO DE INSPECCIÓN VISUAL

NORMA APLICABLE	MÉTODO DE INSPECCIÓN VISUAL <input checked="" type="checkbox"/> Directo <input type="checkbox"/> Remoto	
<input type="checkbox"/> ASTM A-802	FASE DE INSPECCIÓN	TIPO DE INSPECCIÓN
<input type="checkbox"/> MSS-SP 55	<input type="checkbox"/> En Recepción	<input checked="" type="checkbox"/> Ens. Visual Local
<input checked="" type="checkbox"/> CCH 70-4	<input checked="" type="checkbox"/> En Proceso	<input type="checkbox"/> Ens. Visual General
<input checked="" type="checkbox"/> ASME Sec. V, Art. 9	<input checked="" type="checkbox"/> Final	
<input type="checkbox"/> Otro: _____		
	AUXILIARES VISUALES	
	<input type="checkbox"/> Espejo	<input type="checkbox"/> Cámara Fotográfica
	<input checked="" type="checkbox"/> Lentes	<input type="checkbox"/> Sistema de Video
	<input type="checkbox"/> Endoscopio	<input type="checkbox"/> Boroscopio
	<input type="checkbox"/> Fibra Óptica	<input type="checkbox"/> Otro: _____

CONDICIONES DEL ENSAYO

PARÁMETROS DE MEDICIÓN	ILUMINACIÓN	ACABADO SUPERFICIAL
Distancia de Observación: 300 mm.	<input checked="" type="checkbox"/> Luz Artificial	<input type="checkbox"/> Esmerilado <input checked="" type="checkbox"/> Maquinado
Ángulo de Observación: 45 - 90 °	<input checked="" type="checkbox"/> Luz Natural	<input type="checkbox"/> Cepillado <input type="checkbox"/> Granallado
Temperatura de la pieza: 23 - 24 °C	Nivel de Iluminación	<input type="checkbox"/> Otro: _____
Área de Evaluación: 33 cm ²	656 lx	Rugosidad Superficial: 0.391 um

ZONAS DE ENSAYO

Zona de recuperación mediante depósito de soldadura.
 Área de inspección: 60 x 55 mm.
 Inspección 100%

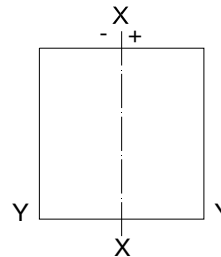
HERRAMIENTAS DE MEDICIÓN

Regla, cuadrante de 100 x 100 mm., calibrador.

CRITERIO DE ACEPTACIÓN

De acuerdo con:
 CCH 70-4 Cahier des Charges Specification for Inspection of Steel Castings for Hydraulic Machines - VT 70-4

CROQUIS / ZONAS ENSAYADAS



DISCONTINUIDADES

No.	Tipo	Posición (mm)	Dimensión		Área (mm ²)	Evaluación
			H (mm)	L (mm)		
-	-	-	-	-	-	-

Leyenda:

RE - Resalte, CA- Cavidad, BO - Borde, FF - Falta de Fusión, FL - Fisura Longitudinal, FT - Fisura Transversal, PO - Porosidad, SO Sobremonta, MO - Mordedura, IE - Inclusión de Escoria, A - Aceptable, R - Reparar, TT - Tratamiento Térmico.

OBSERVACIONES:

No hay presencia de discontinuidades. Nivel de calidad 1.

CONCLUSIÓN: Aceptado Reparar Rechazado Verificación

ELABORADO POR:

Nombre: Ing. Ambar Yépez.

AUTOR DEL PROYECTO



PLAN DE INSPECCIÓN Y PRUEBAS
REPORTE DE INSPECCIÓN VISUAL

Visual Testing

Reg. No.: ETT-REG-CC01

Revisión: 1

Hoja: 2 de 3

Fecha: 28/03/2021



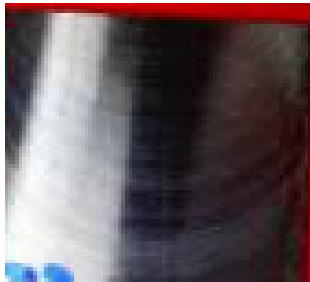
REGISTRO FOTOGRÁFICO - INSPECCIÓN VISUAL



Probeta 001 Réplica 01, Inspección final. No hay presencia de discontinuidades. Aceptado. Nivel de calidad 1.



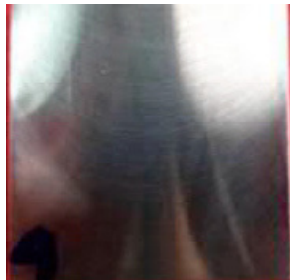
Probeta 001 Réplica 02, Inspección final. No hay presencia de discontinuidades. Aceptado. Nivel de calidad 1.



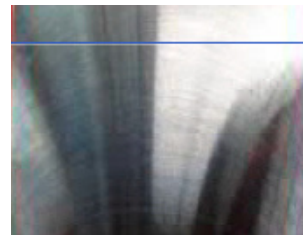
Probeta 001 Réplica 03, Inspección final. No hay presencia de discontinuidades. Aceptado. Nivel de calidad 1.



Probeta 002 Réplica 01, Inspección final. No hay presencia de discontinuidades. Aceptado. Nivel de calidad 1.



Probeta 002 Réplica 02, Inspección final. No hay presencia de discontinuidades. Aceptado. Nivel de calidad 1.



Probeta 002 Réplica 03, Inspección final. No hay presencia de discontinuidades. Aceptado. Nivel de calidad 1.

OBSERVACIONES: Se aplica el Criterio de Aceptación para los niveles de calidad requeridos en las zonas de inspección I, II, III y IV de la ficha de calidad modelo para un rodete Francis de la Norma CCH 70-4.

ELABORADO POR:

Nombre: Ing. Ambar Yépez.

AUTOR DEL PRO YECTO



PLAN DE INSPECCIÓN Y PRUEBAS
REPORTE DE INSPECCIÓN VISUAL

Visual Testing

Reg. No.: ETT-REG-CC01

Revisión: 1

Hoja: 3 de 3

Fecha: 28/03/2021



REGISTRO FOTOGRAFICO - INSPECCIÓN VISUAL



Probeta 003 Réplica 01, Inspección final. No hay presencia de discontinuidades. Aceptado. Nivel de calidad 1.



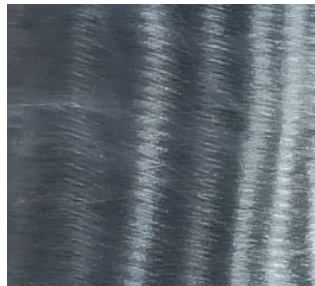
Probeta 003 Réplica 02, Inspección final. No hay presencia de discontinuidades. Aceptado. Nivel de calidad 1.



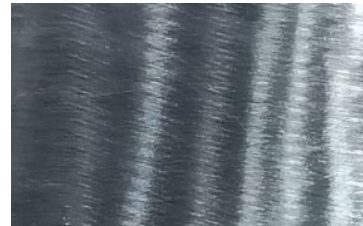
Probeta 003 Réplica 03, Inspección final. No hay presencia de discontinuidades. Aceptado. Nivel de calidad 1.



Probeta 004 Réplica 01, Inspección final. No hay presencia de discontinuidades. Aceptado. Nivel de calidad 1.



Probeta 004 Réplica 02, Inspección final. No hay presencia de discontinuidades. Aceptado. Nivel de calidad 1.



Probeta 004 Réplica 03, Inspección final. No hay presencia de discontinuidades. Aceptado. Nivel de calidad 1.

OBSERVACIONES: Se aplica el Criterio de Aceptación para los niveles de calidad requeridos en las zonas de inspección I, II, III y IV de la ficha de calidad modelo para un rodete Francis de la Norma CCH 70-4.

ELABORADO POR:

Nombre: Ing. Ambar Yépez.

AUTOR DEL PRO YECTO