



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA MECÁNICA

**“CARACTERIZACIÓN METALOGRAFICA Y EVALUACIÓN DEL
PERFIL DE DUREZA EN UNA JUNTA SOLDADA MEDIANTE
PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN ROTACIONAL EN
ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS, MARTENSÍTICOS Y
ACERO AL CROMO”**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO MECÁNICO

AUTOR:

STALYN EDUARDO PILAMUNGA ANDRADE

Riobamba – Ecuador

2022



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA MECÁNICA

**“CARACTERIZACIÓN METALOGRAFICA Y EVALUACIÓN DEL
PERFIL DE DUREZA EN UNA JUNTA SOLDADA MEDIANTE
PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN ROTACIONAL EN
ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS, MARTENSÍTICOS Y
ACERO AL CROMO”**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO MECÁNICO

AUTOR: STALYN EDUARDO PILAMUNGA ANDRADE

DIRECTOR: Ing. CARLOS OSWALDO SERRANO AGUIAR

Riobamba – Ecuador

2022

© 2022, Stalyn Eduardo Pilamunga Andrade

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

Yo, **Stalyn Eduardo Pilamunga Andrade**, declaro que el presente trabajo de integración curricular es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de integración curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 09 de agosto de 2022



Stalyn Eduardo Pilamunga Andrade

060456178-7

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA MECÁNICA

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto Técnico, “**CARACTERIZACIÓN METALOGRAFICA Y EVALUACIÓN DEL PERFIL DE DUREZA EN UNA JUNTA SOLDADA MEDIANTE PROCESO DE SOLDADURA POR FRICCIÓN ROTACIONAL EN ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS, MARTENSÍTICOS Y ACERO AL CROMO**”, realizado por el señor: **STALYN EDUARDO PILAMUNGA ANDRADE**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. M.Sc. Edwin Fernando Viteri Núñez PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		2022/08/09
Ing. Carlos Oswaldo Serrano Aguiar DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2022/08/09
Ing. Miguel Ángel Escobar Guachambala MIEMBRO DEL TRIBUNAL		2022/08/09

DEDICATORIA

A mis padres Rosa y José quienes con su amor incondicional me han abrazado en los momentos más difíciles dándome fuerza para continuar y seguir adelante, por los valores de responsabilidad, honestidad y verdad que me inculcaron. Mis hermanos Geovanny, Cristina, Pablo y Martha que han sido parte impórtate en mi vida. A toda mi familia que siempre han confiado en mi.

Stalyn

AGRADECIMIENTO

A mis padres y hermanos, ellos son lo que me impulsan y alientan a cumplir mis objetivos y metas a pesar de las dificultades.

A mis amigos que han sido una parte importante con su apoyo, consejo y el cariño que me brindan.

A mis profesores y compañeros que conocí en el transcurso de la carrera son y serán quienes aportaron conocimiento y experiencia en mi formación como profesional. Finalmente, a la ESPOCH, por todo lo que me ha brindado durante mi proceso de formación.

Stalyn

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xvi
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xvii
RESUMEN.....	xviii
SUMMARY.....	xix
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I

1.	DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA.....	2
1.1.	Antecedentes.....	2
1.2.	Delimitación.....	3
1.2.1.	<i>Delimitación espacial</i>	3
1.2.2.	<i>Delimitación sectorial</i>	3
1.3.	Formulación del problema.....	3
1.4.	Objetivos.....	4
1.4.1.	<i>Objetivo general</i>	4
1.4.2.	<i>Objetivos específicos</i>	4

CAPÍTULO II

2.	FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	5
2.1.	Aceros	5
2.2.	Aceros al carbono	6
2.2.1.	<i>Composición de los aceros al carbono</i>	6
2.2.2.	<i>Clasificación de los aceros al carbono</i>	7
2.2.2.1.	<i>Aceros de bajo carbono</i>	7
2.2.2.2.	<i>Aceros de medio carbono</i>	7
2.2.2.3.	<i>Aceros de alto carbono</i>	8
2.2.3	<i>Aceero AISI 4140</i>	8
2.3	Aceros inoxidables.....	9

2.3.1	<i>Composición de los aceros inoxidables.....</i>	10
2.3.2.	<i>Clasificación de los aceros inoxidables.....</i>	11
2.3.2.1.	<i>Aceros inoxidables austeníticos</i>	11
2.3.2.2.	<i>Aceros inoxidables martensíticos.....</i>	13
2.4.	<i>Soldadura en estado sólido.....</i>	14
2.4.1.	<i>Soldadura por fricción.....</i>	15
2.4.2.	<i>Ventajas de la soldadura por fricción.....</i>	16
2.4.3.	<i>Desventajas y limitaciones de la soldadura por fricción.....</i>	17
2.5	<i>Soldadura por fricción rotacional.....</i>	17
2.5.1.	<i>Factores que influyen en la soldadura.....</i>	17
2.5.2.	<i>Etapas del proceso de soldadura.....</i>	18
2.5.2.1.	<i>Etapa I: Fricción.....</i>	18
2.5.2.1.1	<i>Contacto inicial.....</i>	18
2.5.2.1.2	<i>Transición.....</i>	18
2.5.2.2.	<i>Etapa II: Forja.....</i>	19
2.6.	<i>Zonas afectadas por el calor</i>	19
2.7.	<i>Métodos de entrada de energía</i>	20
2.7.1.	<i>Soldadura por fricción por inercia.....</i>	20
2.7.2.	<i>Soldadura por fricción directa.....</i>	22
2.7.2.1.	<i>Relación de las variables.....</i>	23
2.8.	<i>Soldabilidad.....</i>	25
2.9.	<i>Selección de parámetros.....</i>	26
2.10.	<i>Ensayo no destructivo.....</i>	27
2.10.1.	<i>Inspección visual.....</i>	27
2.11.	<i>Ensayo destructivo.....</i>	28
2.11.1.	<i>Dureza de los aceros.....</i>	28
2.11.2.	<i>Ensayos para la obtención de dureza.....</i>	28
2.11.3	<i>Tipos de ensayos de dureza.....</i>	29
2.12.	<i>Caracterización metalográfica.....</i>	30
2.12.1.	<i>Preparación de la probeta.....</i>	31
2.12.1.1.	<i>Selección y extracción de la muestra.....</i>	31
2.12.1.2.	<i>Desbaste.....</i>	31
2.12.1.3.	<i>Pulido.....</i>	31
2.12.1.4	<i>Ataque químico.....</i>	32

CAPÍTULO III

3.	MARCO METODOLÓGICO.....	33
3.1.	Materiales.....	33
3.1.1.	<i>Probetas.....</i>	33
3.2.	<i>Proceso de soldadura.....</i>	33
3.3	Parámetros de soldadura.....	35
3.4.	Dimensiones de la probeta para soldadura.....	35
3.4.1.	<i>Codificación de las probetas.</i>	36
3.5.	Equipos.....	37
3.5.1.	<i>Torno TOS TRENCIN SN 40B.....</i>	37
3.5.2.	<i>Equipo de sujeción de probetas.....</i>	38
3.6.	Procedimiento de soldadura.....	38
3.6.1.	<i>Experimentación inicial.....</i>	39
3.6.2.	<i>Preparación de superficie.....</i>	39
3.6.3.	<i>Equipamiento.....</i>	39
3.7.	Etapas de soldadura.....	39
3.7.1.	<i>Etapas I: Fricción.....</i>	39
3.7.1.1.	<i>Contacto inicial.....</i>	39
3.7.1.2.	<i>Transición.....</i>	40
3.7.2.	<i>Etapas II: Forja.....</i>	40
3.8.	Proceso de soldadura.....	41
3.8.1.	<i>Experimentación inicial.....</i>	41
3.8.2.	<i>Experimentación final.....</i>	43
3.9.	Inspección visual.....	47
3.10.	Metodología para el análisis metalográfico.....	47
3.10.1.	<i>Norma.....</i>	47
3.10.2.	<i>Equipo.....</i>	47
3.10.3.	<i>Micrografía.....</i>	48
3.11.	Metodología para realizar el ensayo de dureza Vickers.....	48
3.11.1.	<i>Norma.....</i>	48
3.11.2.	<i>Equipo.....</i>	48
3.11.3.	<i>Probetas para ensayos.....</i>	49
3.11.4.	<i>Procedimiento para realizar el ensayo de dureza.....</i>	50

CAPÍTULO IV

4.	RESULTADOS.....	51
4.1	Inspección visual.....	51
4.2.	Determinación de los constituyentes en la junta soldada.....	53
4.3.	Análisis metalográfico.....	55
4.3.1.	<i>Soldadura de acero inoxidable austenítico AISI 304.....</i>	56
4.3.1.1.	<i>Metal base y zona afectada térmicamente.....</i>	56
4.3.1.2.	<i>Zona afectada térmica y mecánicamente.....</i>	58
4.3.1.3.	<i>Zona de mezclado.....</i>	60
4.3.2.	<i>Soldadura de acero inoxidable martensítico AISI M303.....</i>	61
4.3.2.1.	<i>Material base y zona afectada térmicamente</i>	61
4.3.2.2.	<i>Zona afectada térmica y mecánicamente.....</i>	63
4.3.2.3.	<i>Zona de mezclado.....</i>	65
4.3.3.	<i>Soldadura de acero al cromo AISI 4140.....</i>	66
4.3.3.1.	<i>Material base y zona afectada térmicamente</i>	66
4.3.3.2.	<i>Zona afectada térmica y mecánicamente.....</i>	68
4.3.3.3.	<i>Zona de mezclado.....</i>	69
4.3.4.	<i>Soldadura disímil AISI 304 - AISI M303.....</i>	71
4.3.5.	<i>Soldadura disímil AISI 304 - AISI 4140.....</i>	74
4.3.6.	<i>Soldadura disímil AISI M303 - AISI 4140.....</i>	78
4.4.	Perfil de dureza.....	81
4.5.	Perfil de dureza promedio.....	86
	CONCLUSIONES.....	88
	RECOMENDACIONES.....	90
	BIBLIOGRAFÍA	
	ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2:	Influencia de los elementos en los aceros.....	6
Tabla 2-2:	Composición química del acero medio en carbono AISI 4140.....	8
Tabla 3-2:	Propiedades mecánicas del acero medio en carbono AISI 4140 en condición de suministro	9
Tabla 4-2:	Clasificación de los aceros inoxidable.....	11
Tabla 5-2:	Composición química del acero inoxidable austenítico AISI 304.....	12
Tabla 6-2:	Propiedades mecánicas del acero inoxidable austenítico AISI 304 en condición de suministro	13
Tabla 7-2:	Composición química del acero inoxidable martensítico M303 en condición de suministro	13
Tabla 8-2:	Equivalencia y propiedades del acero inoxidable martensítico AISI M303.....	14
Tabla 9-2:	Clasificación de la soldadura en estado sólido y sus principales características.....	14
Tabla 10-2:	Tipos de soldaduras por fricción rotacional y sus principales características.....	16
Tabla 11-2:	Influencia de las variables en el proceso de soldadura por fricción inercia.	21
Tabla 12-2:	Influencia de las variables en el proceso de soldadura por fricción directa.	23
Tabla 13-2:	Parámetros de soldadura para aceros en barra de 25 mm de diámetro.....	27
Tabla 14-2:	Tipos de ensayos de dureza.....	29
Tabla 15-2:	Tipos de reactivos.....	32
Tabla 1-3:	Parámetros del proceso de soldadura por fricción rotacional	34
Tabla 2-3:	Codificación e interpretación de las probetas	36
Tabla 3-3:	Especificaciones técnicas del centro de mecanizado.....	37
Tabla 4-3:	Variación de los parámetros del proceso de soldadura por fricción rotacional.....	42
Tabla 5-3:	Experimentación final de las probetas de acero inoxidable austenítico AISI 304.....	43
Tabla 6-3:	Experimentación final de las probetas de acero inoxidable martensítico AISI M303.....	44
Tabla 7-3:	Experimentación final de las probetas de acero al cromo 4140.....	45
Tabla 8-3:	Experimentación final soldadura disímil aceros AISI 304 - AISI M303...	45
Tabla 9-3:	Experimentación final soldadura disímil AISI 304 - AISI 4140	46

Tabla 10-3:	Experimentación final soldadura disímil AISI 4140 - AISI M303	46
Tabla 11-3:	Designación de puntos	50
Tabla 1-4:	Probetas de acero inoxidable austenítico AISI 304 descartadas por inspección visual.....	51
Tabla 2-4:	Probetas de acero inoxidable martensítico AISI M303 descartadas por inspección visual.....	51
Tabla 3-4:	Probetas de acero al cromo AISI 4140 descartadas por inspección visual.	51
Tabla 4-4:	Probetas de acero inoxidable austenítico AISI 304 y martensítico AISI M303 descartadas por inspección visual	52
Tabla 5-4:	Probetas de acero inoxidable austenítico AISI 304 y acero al cromo AISI 4140 descartadas por inspección visual.....	52
Tabla 6-4:	Probeta de acero al cromo AISI 4140 y acero inoxidable martensítico AISI M303 y descartadas por inspección visual.....	52
Tabla 7-4:	Composición de los aceros y cálculo del cromo y níquel equivalente...	53
Tabla 8-4:	Valores de dureza Rockwell de juntas soldadas del mismo material.....	82
Tabla 9-4:	Valores de dureza Rockwell de juntas de soldadura disímil.....	82
Tabla 10-4:	Valores de dureza promedio Rockwell C.....	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2:	Clasificación de los aceros por su aleación y contenido de carbono.....	5
Figura 2-2:	Relación del porcentaje de carbono presente en el acero con la resistencia y la ductilidad.....	6
Figura 3-2:	Influencia del contenido en Cr en la velocidad de corrosión de una aleación Fe-Cr en contacto con la atmósfera.....	9
Figura 4-2:	Diagrama de Schaeffler	10
Figura 5-2:	Secuencia básica de soldadura por fricción.....	15
Figura 6-2:	Proceso básico de la soldadura por fricción.....	17
Figura 7-2:	Etapas del proceso de soldadura por fricción.....	19
Figura 8-2:	Zonas afectadas por el calor en una junta por FWSR	20
Figura 9-2:	Características y parámetros de la soldadura por fricción por inercia.....	22
Figura 10-2:	Características y parámetros de la soldadura por fricción directa.....	23
Figura 11-2:	Relación tiempo de calentamiento y presión de calefacción (izq), relación acortamiento axial y presión de calefacción (der).....	25
Figura 12-2:	Soldabilidad de metales, cerámicos y plásticos.....	26
Figura 13-2:	Tipos de ensayos de dureza.....	30
Figura 14-2:	Forma esquemática del desbaste.....	32
Figura 1-3:	Barras de acero AISI 304, AISI M303 y AISI 4140.....	33
Figura 2-3:	Esquema del proceso de soldadura por fricción para aceros AISI 304, AISI M303 y AISI 4140.....	34
Figura 3-3:	Dimensiones de las probetas para soldadura.....	36
Figura 4-3:	Torno ZMM SLIVEN CU 400x2000.....	37
Figura 5-3:	Herramienta de sujeción de probetas.....	38
Figura 6-3:	Fase de contacto inicial.....	39
Figura 7-3:	Cambio de color en las superficies en contacto.....	40
Figura 8-3:	Etapas de transición.....	40
Figura 9-3:	Creación del cordón.....	41
Figura 10-3:	Sistema en reposo.....	41
Figura 11-3:	Probetas soldadas en etapa de experimentación.....	42
Figura 12-3:	Probetas ensayadas experimentación inicial (izquierda) y probetas ensayadas experimentación final (derecha)	43
Figura 13-3:	Microscopio óptico Buehler Ltd.....	48
Figura 14-3:	Equipo para medición de dureza Rockwell	49

Figura 15-3:	Probetas soldadas y cortadas listas para ser pulidas	49
Figura 16-3:	Puntos para medición de dureza Rockwell	50
Figura 1-4:	Zonas afectadas por el calor en una probeta soldada por soldadura por fricción rotacional.....	55
Figura 2-4:	Micrografía del metal base a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta AISI 304.....	56
Figura 3-4:	Micrografía de la transición entre metal base y la ZAT a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta AISI 304.....	57
Figura 4-4:	Micrografía de la ZAT a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta AISI 304.....	58
Figura 5-4:	Micrografía de la zona de transición entre la ZAT y la ZATM a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta AISI 304.....	59
Figura 6-4:	Micrografía de la ZATM a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta AISI 304.....	59
Figura 7-4:	Micrografía de la zona de transición entre la ZATM y la ZM a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta AISI 304.....	60
Figura 8-4:	Micrografía de ZM a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta AISI 304...	61
Figura 9-4:	Micrografía del MB a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta AISI M303.....	62
Figura 10-4:	Micrografía de la transición entre el MB y la ZAT a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta AISI M303.....	62
Figura 11-4:	Micrografía de la transición entre la ZAT y ZATM a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta AISI M303.....	63
Figura 12-4:	Micrografía de la transición entre la ZAT y ZATM a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta AISI M303.....	64
Figura 13-4:	Micrografía de la ZATM a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta AISI M303.....	64
Figura 14-4:	Micrografía de la transición entre la ZATM y la ZM a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta AISI M303.....	65
Figura 15-4:	Micrografía de la transición entre la ZATM y la ZM a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta AISI M303.....	66
Figura 16-4:	Micrografía del MB a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta AISI 4140.....	66
Figura 17-4:	Micrografía de la transición entre el MB y ZAT a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta AISI 4140.....	67

Figura 18-4:	Micrografía de la ZAT a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta AISI 4140.....	68
Figura 19-4:	Micrografía de la transición entre la ZAT y la ZATM a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta AISI 4140.....	68
Figura 20-4:	Micrografía de la ZATM a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta AISI 4140.....	69
Figura 21-4:	Micrografía de la transición entre la ZATM y ZM a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta AISI 4140.....	70
Figura 22-4:	Micrografía de la ZM a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta AISI 4140.....	70
Figura 23-4:	Micrografía de la ZATM (M303) a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta soldada entre AISI 304 y AISI M303.....	71
Figura 24-4:	Micrografía de la ZATM (304) a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta soldada entre AISI 304 y AISI M303.....	72
Figura 25-4:	Micrografía de la transición entre la ZATM y la ZM (M303) a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta soldada entre AISI 304 y AISI M303.....	73
Figura 26-4:	Micrografía de la transición entre la ZATM y la ZM (304) a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta soldada entre AISI 304 y AISI M303.....	73
Figura 27-4:	Micrografía de la ZM a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta soldada entre AISI 304 y AISI M303.....	74
Figura 28-4:	Micrografía de la ZATM (304) a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta soldada entre AISI 304 y AISI 4140.....	75
Figura 29-4:	Micrografía de la ZATM (4140) a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta soldada entre AISI 304 y AISI 4140.....	75
Figura 30-4:	Micrografía de la transición entre la ZATM y la ZM (304) a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta soldada entre AISI 304 y AISI 4140.....	76
Figura 31-4:	Micrografía de la transición entre la ZATM y la ZM (4140) a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta soldada entre AISI 304 y AISI 4140.....	77
Figura 32-4:	Micrografía de la ZM a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta soldada entre AISI 304 y AISI 4140.....	77
Figura 33-4:	Micrografía de la ZATM (4140) a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta soldada entre AISI M303 y AISI 4140.....	78
Figura 34-4:	Micrografía de la ZATM (M303) a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta soldada entre AISI M303 y AISI 4140.....	79
Figura 35-4:	Micrografía de la transición entre la ZATM y la ZM (4140) a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta soldada entre AISI M303 y AISI 4140.....	80

Figura 36-4:	Micrografía de la transición entre la ZATM y la ZM (M303) a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta soldada entre AISI M303 y AISI 4140.....	80
Figura 37-4:	Micrografía de la ZM a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta soldada entre AISI M303 y AISI 4140.....	81
Figura 38-4:	Esquema de los puntos donde se tomó la dureza.....	81

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-4:	Diagrama de Schaeffler ubicado el acero AISI 304, AISI M 303 y AISI 4140.....	53
Gráfico 2-4:	Determinación de la microestructura de la junta soldada entre un AISI 304 y AISI M303.....	54
Gráfico 3-4:	Determinación de la microestructura de la junta soldada entre un AISI 304 y AISI 4140.....	54
Gráfico 4-4:	Predicción de la microestructura de la junta soldada entre un AISI M303 y AISI 4140.....	55
Gráfico 5-4:	Perfil de dureza del acero inoxidable austenítico 304.....	83
Gráfico 6-4:	Perfil de dureza del acero inoxidable martensítico M303.....	83
Gráfico 7-4:	Perfil de dureza del acero al cromo 4140.....	84
Gráfico 8-4:	Perfil de dureza de la soldadura disímil entre un acero inoxidable austenítico 304 y un inoxidable martensítico M303.....	84
Gráfico 9-4:	Perfil de dureza de la soldadura disímil entre un acero al cromo 4140 y un acero inoxidable austenítico 304.....	85
Gráfico 10-4:	Perfil de dureza de la soldadura disímil entre un acero al cromo 4140 y un inoxidable martensítico M303.....	85
Gráfico 11-4:	Perfil de dureza promedio.....	87

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A: Catálogo del acero al cromo AISI 4140.

Anexo B: Catálogo del acero inoxidable AISI 304.

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo realizar la caracterización metalográfica y evaluación del perfil de dureza en una junta soldada mediante proceso de soldadura por fricción rotacional en aceros inoxidable austeníticos, martensíticos y acero al cromo. El proceso de soldadura se realizó en un torno común que alcance mínimo 2000 rpm, debe tener habilitado el freno de emergencia para detener el sistema y evitar el corte por fricción. Los aceros fueron soldados en dos grupos: entre su propia denominación y combinados entre ellos, las probetas en ambos casos mediante un cilindrado en un tono CNC se rebajó 2 mm para evitar contaminantes y en la misma máquina se les mecanizó para que sus geometrías sean compatibles con los mecanismos de sujeción. Las variables como velocidad de revolución, tiempo de calentamiento, tiempo de forja y desplazamiento axial fueron modificadas hasta que aseguraron la mejor calidad de la junta. Una vez enfriadas las probetas siguiendo los parámetros de inspección visual de la AWS se descartó las probetas que presentan discontinuidades, fusión incompleta, descentrado y separación en las juntas. En las probetas aprobadas luego de ser cortadas y pulidas se fue capaz de identificar las zonas afectadas por el calor en las cuales se identificó la microestructura, además se determinó la dureza de estas zonas con lo cual se realizó un perfil de dureza. Las microestructuras de soldadura similar no cambiaron de forma agresiva, en el caso de las soldaduras disímiles el diagrama de Schaeffler predecirá y confirmar la microestructura de la zona de mezclado. Se concluye que las soldaduras donde se encuentre aceros con microestructura martensítica van a ser mucho más duros que los de austenita. Se recomienda automatizar el proceso, debido a que el factor humano está relacionado a la mayoría de fallas en el acabado de la junta.

Palabras clave: <SOLDADURA POR FRICCIÓN ROTACIONAL>, <SOLDADURA MATERIALES DISÍMILES>, <FASES DE SOLDADURA>, <ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO AISI 304>, <ACERO INOXIDABLE MARTENSÍTICO AISI M303>, <ZAT>, <MICROGRAFÍA>, <PERFIL DE DUREZA>

1842-DBRA-UTP-2022



SUMMARY

The objective of this work was to carry out the metallographic characterization and evaluation of the hardness profile in a welded joint by rotational friction welding process in austenitic, martensitic and chrome steel stainless steels. The welding process was carried out in a common lathe that reaches a minimum of 2000 rpm, the emergency brake must be enabled to stop the system and avoid cutting by friction. The steels were welded in two groups: between their own denomination and combined with each other, the specimens in both cases by turning in a CNC tone were lowered 2 mm to avoid contaminants and in the same machine they were machined so that their geometries are compatible with clamping mechanisms. Variables such as speed of revolution, heating time, forging time and axial displacement were modified until they ensured the best joint quality. Once the specimens had cooled following the visual inspection parameters of the AWS, the specimens that presented discontinuities, incomplete fusion, off-centering, and separation in the joints were discarded. In the approved specimens, after being cut and polished, it was possible to identify the zones affected by heat in which the microstructure was identified, in addition, the hardness of these zones was determined, with which a hardness profile was made. The microstructures of similar welds did not change aggressively, in the case of dissimilar welds the Schaeffler diagram will predict and confirm the microstructure of the mixing zone. It is concluded that the welds where steels with martensitic microstructure are found will be much harder than those with austenite. It is recommended to automate the process, since the human factor is related to most failures in the joint finish.

Keywords: <ROTATIONAL FRICTION WELDING>, <DISIMILE MATERIALS WULDING>, <WELDING PHASES>, <AISI 304 AUSTENITIC STAINLESS STEEL>, <AISI M303 MAETENSITIC STAINLESS STEEL>, <ZAT>, <MICROGRAPHY>, <HARDNWEES PROFILE>



Lic. Francisco Mantilla Mgs.
0603747809

INTRODUCCIÓN

La soldadura por fricción rotacional une dos materiales como el acero que pueden ser del mismo tipo o disímiles (diferentes) sin la necesidad de material de aporte, de igual manera no necesita de maquinaria especial, personal certificado, es compatible con todos los aceros, proporciona uniones de resistencia y calidad alta además de no presentar cambios en la microestructura por la acción térmica. Al tener muchas ventajas en comparación a los métodos tradicionales es utilizada en la industria automotriz, aérea, naval, aeroespacial y en la construcción sigue creciendo. Este procedimiento es posible mediante el aporte de energía que genera el rozamiento entre las caras de los aceros a altas velocidades, en este proceso se genera elevadas temperaturas que plastifica los materiales base permitiendo la unión, pero no tan altas para que estos sean fundidos (López González, 2013).

Esta investigación se enfoca en el proceso de soldadura por fricción rotacional con aceros inoxidables AISI 304, M303 y acero al cromo-molibdeno AISI 4140 entre los de su misma denominación y entre ellos, controlando la velocidad angular, en tiempo de calentamiento, el tiempo de forja y el avance longitudinal del torno con la finalidad de obtener la mejor fusión entre los materiales y los mejores acabados. Se realiza las micrografías a las juntas para conocer los cambios que sufre la microestructura y en el caso de los materiales disímiles para conocer el nuevo tipo de microestructura que se forma, luego se procede con el los ensayos de microdureza con el propósito de medir los cambios de la misma según se pase por la zona del material base, zona afectada térmicamente hasta llegar a la zona de mezclado y realizar con estos valores un perfil de dureza; con el objetivo de aportar con el conocimiento, los beneficios y la difundiendo la soldadura por fricción rotacional que es un proceso muy poco conocido y utilizado.

CAPÍTULO I

1. DIAGNOSTICO DEL PROBLEMA

1.1. Antecedentes

Los aceros inoxidable al prevenir la corrosión, protegiendo no solo la superficie sino también la sección de la pieza son considerados de gran utilidad dentro de los trabajos de ingeniería; esto ayudado a que exista una gran familia de estos aceros (Maldonado, 1996). La principal desventaja que poseen es su baja soldabilidad y complejidad al momento de soldar con los métodos tradicionales; desde que se inventó la soldadura en 1900 (evidencia de la primera patente), esta ha ido evolucionando, desarrollándose e innovando nuevos tipos de soldadura como es el caso de la soldadura por fricción (Pender, 1989).

La soldadura por fricción rotacional (*Friction Rotary Welding FRW*), es un proceso relativamente nuevo, se dio a conocer por *The Welding Institute* de Inglaterra en 1991, la cual está comenzando a ser muy utilizada en todo el mundo debido a su bajo costo de producción y mejoras visibles en el acabado (Moreno Siegert, 2008).

Este proceso consiste en unir dos piezas utilizando el calor que se genera al rozarlas y aplicar una fuerza de compresión durante lapso corto de tiempo, con lo cual se asegura que la junta quede unida. Para alcanzar los mejores resultados es necesario tomar en cuenta la velocidad rotacional, la presión axial además del tiempo aplicado, dichas variables se complementan entre si y la combinación adecuada nos entrega una junta soldada con excelentes propiedades mecánicas, además de ser visualmente más uniforme, Además se caracteriza por soldar metales de baja soldabilidad, no necesita material de relleno, ni gases de protección y los metales a trabajar no se funden; además al no existir fundición solo las zonas que están en fricción son afectadas por el calor mientras las demás conservan sus propiedades intactas (López González, 2013). Todo esto generó un gran impacto mundial, llegando a ser de gran importancia dentro de industrias como: automotriz, aérea, naval, aeroespacial, de defensa, de transporte y llega hasta sectores de la construcción (American Welding Society, 1975).

Dentro de la región en países como Chile y la universidad Bio-Bio, Colombia y la universidad EAFIT presentan trabajos donde dan a conocer los principios, tipos, además guías para el proceso de soldadura por fricción e incluso presentan las herramientas que se deben adaptar en caso de no contar con la maquinaria especializada (López González, 2013; Moreno Siegert, 2008).

Al ser un tema de gran potencial investigativo y de desarrollo; centros de investigación y de educación superior han mostrado su interés con investigaciones, tesis de grado y artículos científicos. El trabajo de Estudio de la soldabilidad entre un acero inoxidable y un acero al

carbono desarrollado por la Escuela Politécnica Nacional en el 2017 (Chávez Sarango, 2017) logro soldar satisfactoriamente estos metales, de la misma Escuela Politécnica Nacional la tesis Estudio y caracterización de la soldabilidad en aluminio y latón (Angamarca Pupiales y García Claudio, 2018) incluso logró luego de variar los parámetros de soldadura encontrar la combinación adecuada para unir estos dos metales disímiles. Metales como los inoxidable, al carbono y el aluminio son de gran interés y estudio, principalmente para el aluminio universidades como la Técnica de Ambato, San Francisco de Quito , incluso la ESPOCH para aceros inoxidable y al carbonos presentan sus trabajos en los cuales mediante soldadura por fricción rotacional o agitación, relacionan y comparan las propiedades mecánicas, microestructura y dureza antes y después de la soldadura (Toapanta Bautista, 2015; Pérez Enriquez, 2018; Villavicencio Cevallos, 2011), concluyendo que ninguna de las propiedades mecánicas del material base disminuye, de lo contrario se mantienen o incluso en la mayoría de los casos aumenta.

La soldadura por fricción rotacional en Ecuador se encuentra en etapa de estudio, por lo cual esta investigación pretende realizar un estudio detallado del proceso de soldadura además de verificar si es posible mejor las propiedades de la junta de soldadura similar y disímil en metales inoxidable y un al cromo, también se busca informar de sus beneficios y si es recomendable su uso para una posterior implementación dentro de la industria metalúrgica ecuatoriana con fines de crecimiento y expansión.

1.2. Delimitación

1.2.1. Delimitación espacial

El presente trabajo se desarrollará en la ciudad de Riobamba, provincia de Chimborazo del territorio nacional del Ecuador.

1.2.2. Delimitación sectorial

El estudio y desarrollo de este trabajo se acoge al Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021, en base al objetivo 1 el cual indica; Garantizar una vida digna con iguales oportunidades para todas las personas.

1.3. Formulación del problema

La soldadura por fricción al ir teniendo cada vez más atención debido a sus beneficios, está llamada a ser el proceso de soldadura más utilizado para metales de difícil soldabilidad. Éste al ser un proceso relativamente nuevo no consta con todos los valores de fuerza de compresión y tiempo de aplicación de la fuerza para los distintos aceros existentes; al ser parte de la carrera de Ingeniería Mecánica se debe ayudar en la investigación y desarrollo de la misma para lo cual se realizara el estudio de la manera influyen los parámetros de soldadura por fricción sobre la

metalografía y dureza en las uniones de aceros inoxidable austeníticos y martensíticos y un acero al cromo-molibdeno.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Realizar la caracterización metalográfica y evaluación del perfil de dureza en una junta soldada mediante proceso de soldadura por fricción rotacional en aceros inoxidable austeníticos, martensíticos y acero al cromo.

1.4.2. Objetivos específicos

- Revisar el estado del arte sobre soldadura en estado sólido por fricción rotacional para aceros inoxidable.
- Variar los parámetros de la soldadura por fricción con el fin de encontrar la combinación de los mismo con los que se obtiene las mejores juntas.
- Evaluar metalográficamente las juntas soldadas y la influencia de esta soldadura en las zonas cercanas a la junta.
- Determinar el perfil de durezas de las juntas soldada por fricción rotacional.
- Analizar y discutir los resultados con herramientas estadísticas.

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Se detalla los principios teóricos de los aceros al carbono e inoxidables su clasificación, composición, nomenclatura según la ASTM; de igual manera ahonda en los temas de soldadura por fricción como son: sus principios, ventajas, desventajas, etapas y los parámetros que la controlan, métodos de entrada de energía, dureza y las normas para su ensayo, conocimientos necesarios para el entendimiento del proyecto de investigación.

2.1. Aceros

“Los aceros son aleaciones hierro-carbono con concentraciones apreciables de otros elementos aleantes” (William D. Callister, 2012). Con la combinación de composiciones y tratamientos térmicos se crea un gran número de aceros, en los cuales se tiene un porcentaje de carbono menor al 1%, del cual dependen las propiedades mecánicas. Organismos como *Society of Automotive Engineers* (SAE), *Iron And Steel Institute* (AISI) y la *American Society for Testing and Materials* (ASTM) fueron los que clasificaron, denominaron y dar las especificaciones los aceros y sus aleaciones; estas sociedades utilizan la designación AISI/SAE acompañada de 3 ó 4 dígitos que indican la aleación principal y la cantidad de carbono de los aceros.

Como se observa en la figura 1-2 los aceros se dividen por el nivel de aleación, estos a su vez en alto, medio y bajo contenido de carbono; de igual manera estas divisiones poseen subgrupos de acuerdo al contenido de las aleaciones que contengan (William D. Callister, 2012).

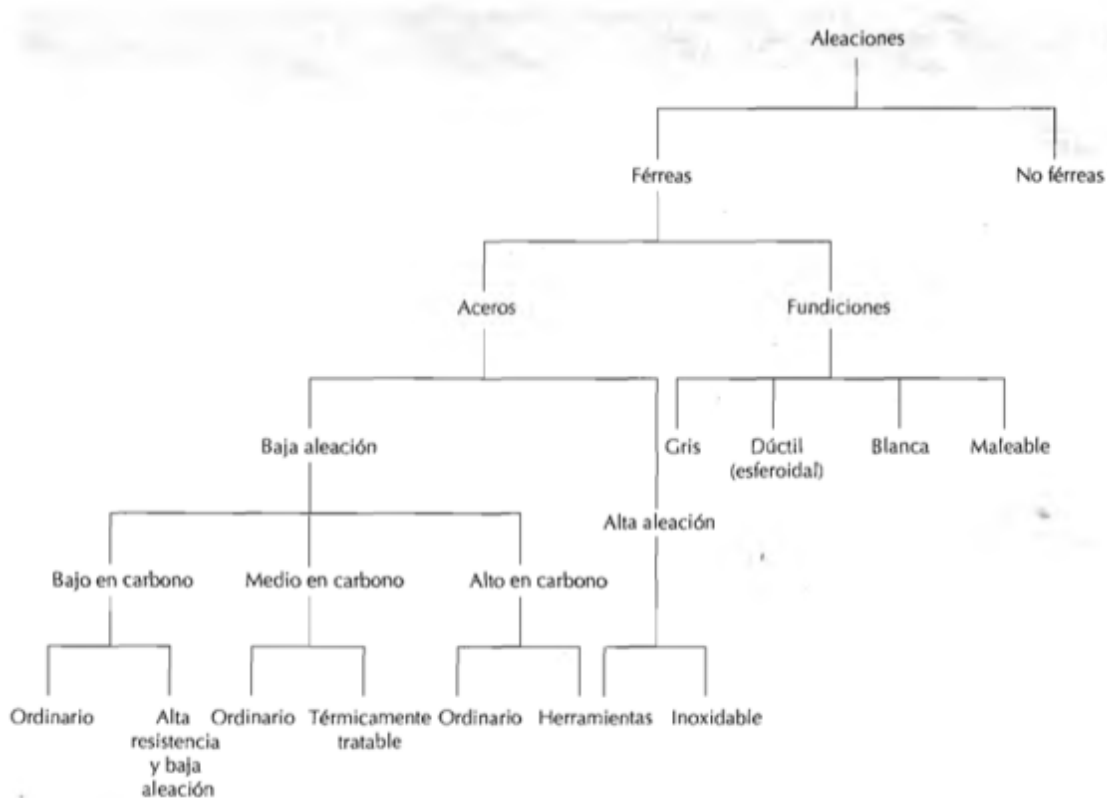


Figura 1-2: Clasificación de los aceros por su aleación y contenido de carbono

Fuente: (William D. Callister, 2012).

2.2. Aceros al carbono

Los aceros de este tipo tienen un contenido de carbono relativamente bajo por lo general menor al 2%. El carbono influye de gran manera directa en la resistencia del acero, es decir, con más carbono será más resistente, además que se reduce la relación de la ductilidad, siendo esta la capacidad de un material para deformarse de forma permanente evitando la ruptura (Rodríguez Romo, 2017), la relación de estas dos propiedades se muestra en la figura 2-2.

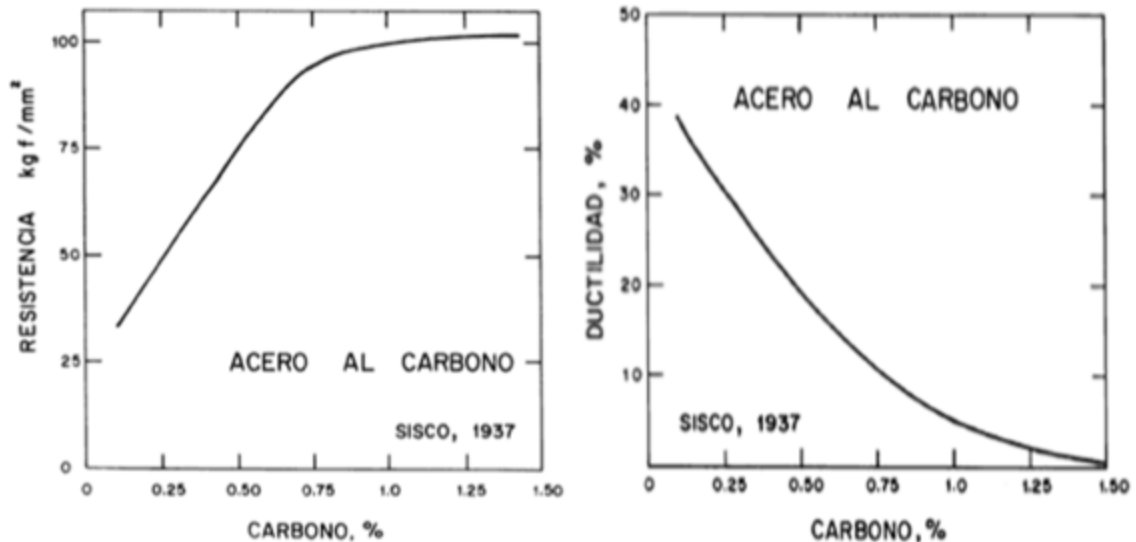


Figura 2-2: Relación del porcentaje de carbono presente en el acero con la resistencia y la ductilidad

Fuente: (Rodríguez Romo, 2017)

2.2.1. Composición de los aceros al carbono.

Estos aceros también poseen otros elementos que son agregados por dos razones principales: un grupo son el resultado del proceso de fabricación como el manganeso (Mn) que tiene como propósito combinarse con el azufre para impedir la formación de sulfuro de hierro II (FeS) debido a que este se presenta en forma de inclusiones en los bordes del grano fijando una tendencia a agrietarse, y metales como el Si, Cr, Mo, Mn, Ni son adicionados para mejorar determinada propiedad (Belzunce, 2001).

En la tabla 1-2 se presenta los principales elementos aleantes y la manera que afecta a las propiedades mecánicas aumentando la tenacidad, dureza y resistencia, a las propiedades magnéticas descendiendo o ascendiendo la fuerza coercitiva y anulando su magnetismo, de igual manera proporcionando resistencia al ataque químico como es la reducción de la oxidación en ambientes húmedos y disminución de la corrosión atmosférica (Natera et al., 2017).

Tabla 1-2: Influencia de los elementos en los aceros

Elemento	Características
Aluminio (Al)	Reduce el oxígeno durante la fabricación (desoxidante). Restringe el crecimiento del grano por formación de óxidos y nitruros.

Cromo (Cr)	Incrementa la resistencia a la oxidación y corrosión. En conjunto con un alto contenido de carbono mejora la resistencia al desgaste y la abrasión.
Manganeso (Mn)	Se combina con el azufre para disminuir la fragilidad.
Molibdeno (Mo)	Mejora la templabilidad. Aumenta la resistencia a la corrosión y abrasión.
Níquel (Ni)	En aceros altos en cromo es un estabilizador de la austenita.
Silicio (Si)	Es desoxidante y aumenta la resistencia en aceros de baja aleación.

Fuente: (Natera et al., 2017).

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

2.2.2. Clasificación de los aceros al carbono

Los aceros se clasifican por el nivel de carbono que está presente en su composición, por lo general el carbono existente en estos aceros suele variar desde 0.05 hasta 1.0% y el de manganeso desde 0.25 hasta 1.7%. Al aumento del carbono está directamente relacionado con la presencia de perlita y por lo tanto con la resistencia mecánica, en cambio el manganeso al ser de carácter gammágeno su adición afecta el tamaño de grano de la ferrita y la proporción de perlita. La forma más barata de incrementar la resistencia mecánica de un acero es la adición de carbono a la colada, pero a su vez esta disminuirá la tenacidad del producto (Belzunce, 2001).

2.2.2.1. Aceros de bajo carbono

Este es el acero que más común y utilizado debido a ser altamente soldable y de fácil mecanizado por lo mismo se encuentra en vigas para la construcción de edificios, puentes, barcos recipientes a presión, en la industria automotriz para las carrocerías, etc.; tienen un contenido de carbono menor al 0,25%. Su microestructura está construida por perlita y ferrita por lo tanto son relativamente blandos y poco resistentes, pero propiedades como la ductilidad y tenacidad son excelentes. Ejemplares como el AISI 1010, 1020 y A36 son los más representativos.

Dentro de estos aceros existe un subgrupo denominado Alta resistencia y baja aleación (HSLA), que posee elementos como el cobre, vanadio, níquel y molibdeno con el fin de mejorar las propiedades mecánicas y aumentar la resistencia a la corrosión (William D. Callister, 2012).

2.2.2.2. Aceros de medio carbono

Los aceros medios en carbono se utilizan para piezas como ejes, cigüeñales, rieles y engranajes que necesitan una media resistencia mecánica, además de una buena resistencia al desgaste y alta tenacidad; tienen un contenido de carbono de 0,25 a 0,6% que consecuentemente aumenta la resistencia mecánica. Estos aceros a diferencia de los bajos en carbono si pueden ser tratados térmicamente para mejorar sus propiedades, siendo la austenización, el temple y revenido los tratamientos

posibles. Debido a elementos como el cromo, níquel y molibdeno es posible mejorar las propiedades mecánicas y físicas, capacidad para ser tratado térmicamente además de obtener varias combinaciones de resistencia- ductilidad. En este grupo los AISI 40xx, 41xx, 43xx, 51xx y 86xx son los más utilizados en la industria (Belzunce, 2001; William D. Callister, 2012).

2.2.2.3. Aceros de alto carbono

Poseen un contenido de carbono entre 0,6 y 1,4%, por lo tanto, son los más resistentes y duros, en consecuencia, los de menor ductilidad. Generalmente son utilizados en herramientas para corte, matrices, hojas de sierra, cuchillo y resorte que necesitan alta resistencia debido a su alta resistencia al desgaste. Elementos como el cromo, molibdeno, tungsteno y vanadio son parte de estos aceros, los cuales al combinarse con el C forman carburos que aportan dureza y resistencia al desgaste. Aceros como el AISI W1, S1, O1, A1, D2 y M1 pertenecen a este grupo (William D. Callister, 2012; Villarreal Guzmán, 2007).

2.2.3. Acero AISI 4140

Se caracteriza por tener una alta resistencia a la fatiga, al impacto, a la torsión, a la abrasión y dureza además de contar con una proporción resistencia-peso alta, razones por lo cual es muy utilizado en la industria del petróleo, gas, agricultura, automotriz y aeroespacial en la fabricación de moldes, engranajes, husillos, bielas entre otras piezas. Para lograr estas características esta aleado con azufre, cromo, fósforo, manganeso, molibdeno y silicio en porcentajes que se observan en la tabla 2-2, obteniendo propiedades mecánicas que se observan en la tabla 3-2 (Material Mundial, 2020a; ThyssenKrupp, 2010).

Tabla 2-2: Composición química del acero medio en carbono AISI 4140

% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Mo
0,38-0,43	0,15-0,35	0,75-1	0,03	0,04	0,8-1,1	0,15-0,25

Fuente: (ThyssenKrupp, 2010).

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

Dentro de la influencia de los elementos se tiene: al cromo que forma carburos como el Cr_7C_3 , Cr_4C y $(FeCr)_3C$ que aumenta su dureza y resistencia al deterioro, el molibdeno de igual manera aumenta su dureza además de proporciona alta resistencia a trabajar en altas temperaturas, el manganeso que se combina con el sulfuro con el fin de evitar la formación de sulfuro de manganeso que tiene un punto de fusión bajo y formación de inclusiones en el borde del grano las cuales producen fisuras del material (Hernandez Brito, 2008).

Tabla 3-2: Propiedades mecánicas del acero inoxidable austenítico AISI 4140 en condición de suministro

Resistencia a la tracción (kg/mm ²)	Resistencia a la cedencia min. (kg/mm ²)	Elongación %	Dureza HB	W.Nr	Designación europea
90-105	70	12 min	275-320	1,722 5	24CrMo4

Fuente: (ThyssenKrupp, 2010).

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

2.3. Aceros inoxidables

Los aceros inoxidables son aquellas aleaciones resistentes a la corrosión aunque no a todos los medios corrosivos (Villavicencio Cevallos, 2011). Para la composición de estos aceros se tiene como base la aleación hierro-carbono y una masa de cromo con una concentración mínima del 12%, además de otros elementos aleantes que mejoran sus propiedades. En la figura 3-2 se puede observar y comprender porque es necesario el contenido mínimo del 12% de cromo en las aleaciones de aceros inoxidables, debido a su efecto en la velocidad de corrosión, ya que con contenidos mayores es prácticamente cero. Al ser la principal propiedad su alta resistencia a la corrosión se debe decir que esta se logra al formarse una invisible y adherente capa de óxido de cromo (Cr₂O₃) que se forma al estar en contacto la superficie con el oxígeno de la atmósfera (Merino Casals, 2017).

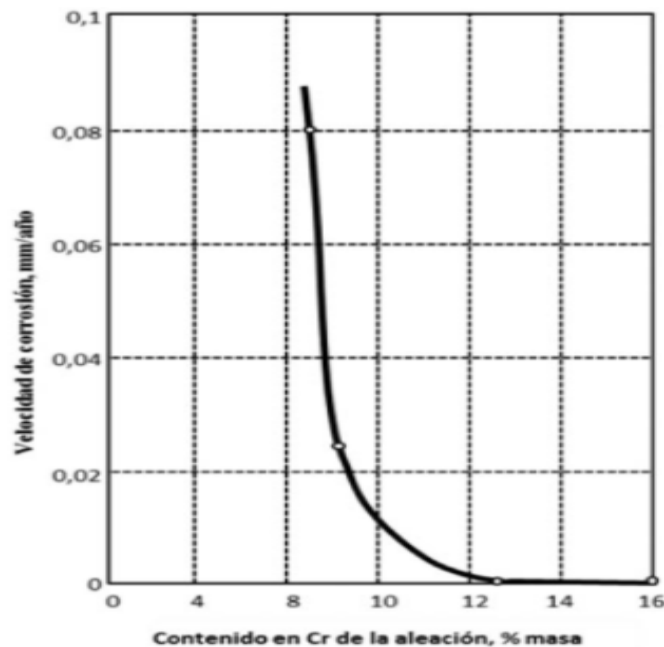


Figura 3-2: Influencia del contenido en Cr en la velocidad de corrosión de una aleación Fe-Cr en contacto con la atmósfera

Fuente: (Merino Casals, 2017)

Para nombrar este tipo de aceros la *Society of Automotive Engineers* (SAE) y *Iron And Steel Institute* (AISI) mantiene la designación AISI/SAE acompañada de la serie 300 y 400.

2.3.1. Composición de los aceros inoxidable

Los aceros inoxidable además del hierro y el cromo se les añaden otros elementos, tales como níquel, molibdeno, cobre, aluminio, manganeso, silicio, titanio, entre otros. Estos elementos son los que producen alteraciones en el diagrama de fases hierro-carbono modificando las propiedades pero principalmente las microestructuras y originando así su clasificación (William D. Callister, 2012).

Estos elementos aleantes están relacionados con la variación que sufre el trazado del diagrama de equilibrio a las aleaciones Fe-C, por lo tanto se han determinado dos grupos: los estabilizadores gamma o gammágenos que tienen elementos como el Ni, Mn, C, N y Cu como los más importantes, estos son los encargados de expandir el campo austenítico (γ), además de beneficiar la formación de austenita ccc y los estabilizadores alfa o alfágenos que contraen el campo austenítico y favorecen la formación de ferrita cc, sus principales elementos son el Si, Al, P y B que ayudados de Ta, Nb y Zn forman carburos y otros que no necesitan ayuda como el Cr, Ti, V, Mo. Tanto para gammágenos o alfágenos existe un elemento de aleación característico como son el níquel y cromo respectivamente; no se debe olvidar que los demás elementos aleantes pueden alterar las fases (austenita y ferrita) que poseen estos aceros (Merino Casals, 2017). Para poder valorar el efecto que cada uno de los elementos en la metalurgia se debe referir cada uno de estos a su grupo y utilizar el diagrama de Schaeffler de la figura 4-2, mismo que utiliza los conceptos de níquel y cromo equivalente, en el cual a cada componente tiene establecido un coeficiente multiplicador, reemplazando los valores en las ecuaciones que se encuentran en la figura se obtendrá el coeficiente de cromo y níquel equivalente, valores que ayudan a predecir la microestructura del acero por su composición.

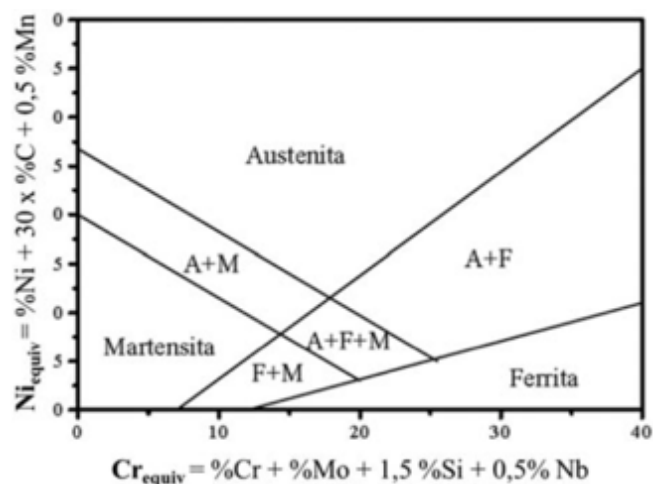


Figura 4-2: Diagrama de Schaeffler

Fuente: (Merino Casals, 2017).

2.3.2. Clasificación de los aceros inoxidables

En la tabla 4-2 se puede observar una clasificación de los aceros inoxidables basada en la su microestructura, además se menciona propiedades propias de cada grupo.

Tabla 4-2: Clasificación de los aceros inoxidables

Grupo	Estructura	Propiedades
Austeníticos	Cubica centrada en la cara.	No magnéticos. No endurecidos por tratamiento térmico. Monofásicos desde 0 K hasta fusión. Fáciles de soldar Excelente resistencia a la corrosión.
Ferríticos	Cubica centrada en el cuerpo.	Magnéticos. No endurecidos por tratamiento térmico. Alta resistencia mecánica a temperatura ambiente. Con bajo C son fáciles de soldar
Martensíticos	Tetragonal centrada en el cuerpo.	Magnéticos. Endurecidos por tratamiento térmico. Menor resistencia a la corrosión. Difíciles o imposibles de soldar.
Dúplex	Mixta ferrita-austenita	Magnéticos. No endurecidos por tratamiento térmico. Fáciles de soldar.
Endurecido por precipitación.	Base austenítica o martensítica	Magnéticos. Endurecidos por tratamiento térmico. Ultra alta resistencia mecánica.

Fuente: (Merino Casals, 2017).

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

2.3.2.1. Aceros inoxidables austeníticos

Estos aceros tienen como característica mantener su estructura austenítica en presencia de cualquier temperatura, es decir, el tratamiento térmico de temple no tendría ningún efecto, al contrario, si se requiere modificar las propiedades de estos aceros se debe realizar: recocido completo por rápido enfriamiento de temperaturas elevadas, relevo de esfuerzos o endurecimiento superficial por nitrurado (Maldonado, 1996). Además poseen una composición de cromo que varía entre el 16% y 26%, contenidos de níquel hasta de 35% que ayuda a suprimir la transformación de la austenita manteniéndola estable a cualquier temperatura y manganeso hasta 16% dependiendo de la serie (Ibarra, 2010).

El acero inoxidable austenítico tiene como ventaja sobre los demás grupos de aceros inoxidables que en la presencia de temperaturas cercanas al cero absoluto mantiene su fragilidad (Villavicencio Cevallos, 2011). La serie que han designado los diferentes organismos son la 200 para aleaciones de cromo-manganeso-nitrógeno y la serie 300 para aleaciones de cromo-níquel que son las más utilizadas.

Acero inoxidables serie 300

Estos son los aceros inoxidables más utilizados y fáciles de encontrar en el mercado, su composición tiene como base al Cr entre el 15 al 32%, además de níquel entre el 6 al 22% y manganeso máximo del 2%, de igual manera elementos como el cobre, aluminio, titanio, silicio, molibdeno y niobio serán agregados dependiendo de la característica que se quiera mejorar o conferir. Otro elemento muy usual en añadir es el azufre (S) que ayuda en la mecanización del acero (Merino Casals, 2017). Los aceros de esta serie poseen una estructura atómica ccc (cristalina cubica centrada en el cuerpo), conjuntamente una microestructura formada por granos equiaxiales de austenita como consecuencia se obtiene una inherente, una elevada ductilidad y alta resistencia a impactos a cualquier temperatura. Como propiedades adicionales sobresalen su factor higiene-limpieza por lo que es muy usual ocupar esta serie en equipos industriales, equipos alimenticios además del uso arquitectónico, y que estos aceros son totalmente reciclables.

Aceros inoxidables AISI 304

Es el más utilizado y representativo de esta serie, su composición química se observa en la tabla 5-2, como características tiene una estructura atómica ccc, no es magnético, resiste tanto bajas como altas temperaturas, tiene una buena procesabilidad debido al azufre que posee.

Si estos aceros son expuestos durante lapsos de tiempo considerables el carbono y el cromo reaccionan formando carburo de cromo, lo que deriva en una baja en el contenido de cromo en la región cerca del límite del grano esto reduce la resistencia a la corrosión (Material Mundial, 2020b), para disolver estos carburos precipitados se debe realizar un temple austenítico.

Tabla 5-2: Composición química del acero inoxidables austenítico AISI 304

% C	% Si	% Mn	% P máx.	% S	% Cr	% Ni	% Mo
≤ 0,08	≤ 1,00	≤ 2,00	≤ 0,045	≤ 0,015	18,0 – 20,0	8,0 – 10,5	— —

Fuente: Ivan Bohman, 2016.

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021

La tabla 6-2 muestra las propiedades mecánicas del acero AISE 304 con el cual se va a trabajar y la cual proporcionara valores de referencia a tener en cuenta.

Tabla 6-2: Propiedades mecánicas del acero inoxidable austenítico AISI 304 en condición de suministro

Resistencia a la tracción (kg/mm ²)	Resistencia a la cedencia min. (kg/mm ²)	Elongación %	Dureza HB (máx)	W.Nr	Designación europea
54	21	58 min	190	1,430 12	X5CrNi 18-10

Fuente: Ivan Bohman, 2016.

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021

2.3.2.2. Aceros inoxidables martensíticos

Comparte con los aceros inoxidables ferríticos una parte de la serie AISI 400 de la denominación de los aceros inoxidables. Su principal característica metalúrgica es su alto contenido de elementos para aleaciones anticorrosivas, esto causa que la martensita se mantenga inactiva, dando como resultado una dureza muy alta (Maldonado, 1996). Dentro de su composición se puede decir que posee un alto contenido de carbono en comparación con los otros aceros inoxidables que es del 0,1 – 1,2%, cromo desde 10,5 con un máximo de 14 o 18% dependiendo el tipo, además de otros elementos para mejorar las propiedades mecánicas y contrario con los austeníticos a estos aceros no se les agrega níquel (N) a excepción de la serie M303 que poseen una cantidad menor al 0,9% (Ibarra, 2010). Posee una estructura bcc (cúbica centrada en el cuerpo), son magnéticos, debido a su alto contenido de carbono estos aceros pueden cambiar su resistencia aplicando un tratamiento térmico y esto es lo que se realiza por lo general antes de su uso (PUREST, 2002).

Aceros inoxidables martensíticos M303

El acero M303 es un acero inoxidable martensítico templado por precipitación, con un contenido del 14,5% de cromo, que proporciona una alta resistencia al desgaste, alta resistencia a la corrosión además de una excelente tenacidad. Para poder aprovechar su alta resistencia al desgaste y a la abrasión es muy usado en aplicaciones como: en herramientas de sujeción, moldes para elastómeros, cuchillos para la industria alimenticia e instrumentos de medición. En la tabla 7-2 se observa detalla la composición de este acero inoxidable AISI M303.

Tabla 7-2: Composición química del acero inoxidable martensítico AISI M303 en condición de suministro

% C	% Si	% Mn	% Cr	% Ni	% Mo
0,27	0,30	0,65	14,5	0,85	1,00

Fuente: (Ivan Bohman, 2016)

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021

La tabla 8-2 muestra las propiedades mecánicas que del AISI M303 con la cual se va a realizar la investigación.

Tabla 8-2: Equivalencia y propiedades del acero inoxidable martensítico AISI M303

Resistencia a la tracción (kg/mm ²)	Módulo de elasticidad (10 ³ N/mm ²)	Elongación %	Dureza HB (máx.)	Designación europea
80,56	210	50	290 - 330	X5CrNi 18-10

Fuente:(Ivan Bohman, 2016).

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021

2.4. Soldadura en estado sólido

La soldadura por estado sólido es un tipo de soldadura en la que se logra unir dos áreas en contacto mediante la aplicación de variables como son la presión y el calor, mismo que no debe alcanzar la temperatura de fusión. En los procesos que es necesaria la aplicación conjunta de presión y calor es necesario tener muy presente la variable tiempo, debido a que aplicada correctamente logrará la soldadura y una excelente cohesión entre las áreas en contacto. En este tipo de soldadura se observa que los granos de una superficie y los granos de la otra superficie que participan en el proceso experimentan una atracción lo que permite soldar el material sin la necesidad de un material de aporte ni la fusión de los mismo (López Gonzáles, 2013). La comprensión de este proceso de soldadura dio lugar a su propia clasificación, misma que la tabla 9-2 muestra junto con sus características más esenciales.

Tabla 9-2: Clasificación de la soldadura en estado sólido y sus principales características

Tipo de soldadura	Características
Soldadura en frío (Cold welding CW)	Se realiza a temperatura ambiente. Ocurre cuando se aplica la suficiente presión sobre dos superficies hasta lograr un contacto íntimo y lograr la cohesión.
Soldadura por difusión (Difusión welding DFW)	Es necesario aplicar presión y calor. Se realiza en una atmósfera controlada durante un tiempo adecuado hasta que ocurra la difusión y coalescencia.
Soldadura por explosión (Explosion welding EXW)	Utiliza la fuerza de la explosión. Aunque la explosión genera calor la soldadura no ocurre por esta, sino por la presión que se genera.
Soldadura por forja (Forgr welding FOW)	Las piezas a trabajar deben estar calentadas al 80-90% de la temperatura de fusión. Es necesaria la aplicación de presión para efectuar la soldadura.
Soldadura por ultrasonido (Ultrasonic welding USW)	Ocurre al aplicar intensas presiones oscilatorias de frecuencia ultrasónica a la interfase para producir la coalescencia. Se ocupan frecuencias entre 15-75 KHz, y las amplitudes que varían de 0.18 a 0.13mm.

Soldadura por fricción (Friction welding FW)	Utiliza el calor generado por la fricción mecánica entre dos piezas, una fija y otro rotando. La temperatura puede estar cerca al punto de fusión.
---	---

Fuente: (López Gonzáles, 2013).

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021

2.4.1. Soldadura por fricción

En el proceso de soldadura por fricción la energía que se requiere es producida cuando dos piezas giran o se mueven entre sí, al estar en contacto la fricción mecánica genera el calor que se necesita para el proceso, una vez alcanzada la temperatura de soldadura se detiene de maneta violenta el movimiento sea rotacional o lineal y se aplicar una presión de empuje para generar la soldadura por interpenetración granular, lo cual se observar de manera general en la figura 5-2, todo esto sin adición material ni capas de protección (López Gonzáles, 2013). De igual manera es visible que la zona donde se unen las dos piezas, es decir la zona afectada por el calor o ZAC es pequeña en relación con los métodos tradicionales, misma en la que solo se encuentra material deformado plásticamente y ausencia de una zona de fusión.

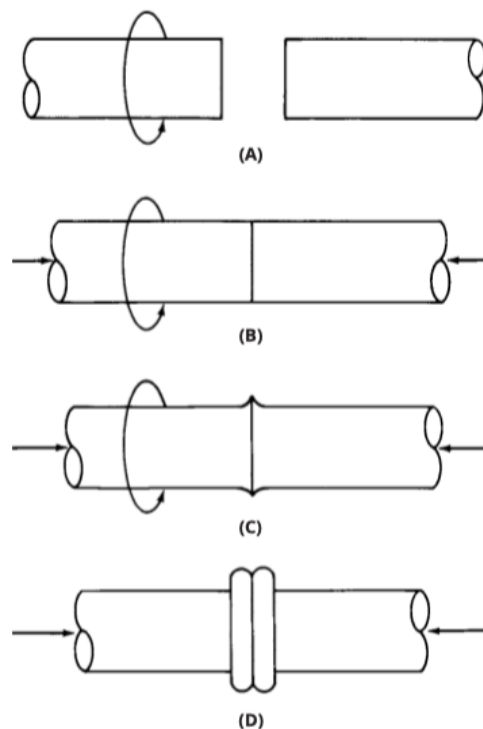


Figura 5-2: Secuencia básica de soldadura por fricción

Fuente: (American Welding Society, 1975).

Para este proceso en referencia a las piezas a soldar una se debe mantener una fija y otra llamada pieza de revolución tendrá movimiento de rotación o de translación en su eje longitudinal. Por lo general la geometría de estas piezas son cilindros si se trata de rotación y placas rectangulares si

no. Esta soldadura debido a que se puede utilizar en materiales similares o de naturaleza distinta, es decir se puede aplicar entre aceros de la misma clase o con cualquiera de sus aleaciones; este proceso es utilizada en procesos de gran volumen, cuando la geometría no permite el uso de los métodos tradicionales, lo cual a permitido su uso dentro de industrias como la química, agrícola, transporte, aeroespacial, construcción entre otra. En la tabla 10-2 se puede observar la clasificación y su característica más importantes que se genera de este proceso pariendo del movimiento y forma de la pieza de revolución (American Welding Society, 1975).

Tabla 10-2: Tipos de soldaduras por fricción rotacional y sus principales características

Tipo de soldadura	Características
Soldadura por fricción – agitación. (Friction stir welding FSW)	Suelda dos piezas (placas o laminas) alineadas una junto a la otra. El eje del cilindro debe ser perpendicular a las placas. Se utiliza una herramienta compuesta por dos cilindros concéntricos el de menor diámetro llamado pin y es el encargado de producir la plastificación, agitación y mezcla del metal.
Soldadura por fricción lineal. (FLW)	Utiliza dos placas una frente a la otra por una cara del espesor. Se produce al rozar las dos piezas con movimiento lineal oscilatorio.
Soldadura por fricción rotacional. (FRW)	Utiliza dos piezas de geometría cilíndrica. Su produce al rozar los cilindros con movimiento giratorio a una de estas y aplicando una presión.

Fuente: (American Welding Society, 1975; López Gonzáles, 2013).

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021

2.4.2. *Ventajas de la soldadura por fricción*

Dentro de las ventajas se encuentran las siguientes, que topan los campos operativos y económicos (American Welding Society, 1975):

- El metal de aporte y gases de protección son necesarios.
- El proceso es compatible con toda la gama de aceros existentes, incluso para unir materiales disímiles.
- La mínima resistencia de la unión es igual a la resistencia del metal más débil, esta puede aumentar variando los parámetros de soldadura.
- Fallas comunes en los procesos tradicionales como porosidades, inclusiones, fisuras o defectos de solidificación son prácticamente inexistentes.
- Es un proceso limpio debido a la reducción de chispa, vapores y humo.
- La preparación de las probetas no es tan rigurosa.
- Personal calificado no es necesario.
- El acabado de la unión es más limpio y fácil de limpiar con un mecanizado.

2.4.3. Desventajas y limitaciones de la soldadura por fricción

A continuación, las desventajas y limitaciones más importantes de soldadura por fricción:

- El costo de implementación en maquinaria y herramientas es alto, por lo tanto, debe ser destinado a volúmenes de producción grandes.
- Las piezas deben tener un eje de simetría, por lo que la geometría de estas se limita a dos básicamente para cualquier trabajo, esto estipula el tipo maquinaria que se va a usar.
- La alineación entre piezas tiene un papel importante debido que garantiza una un calor uniforme.

2.5. Soldadura por fricción rotacional

La soldadura por fricción rotacional permite la unión de cualquier material de igual o distinta composición, basándose en la transformación de energía mecánica que se genera por el rozamiento de las caras de dos cilindros puesto en contacto en energía térmica necesaria para poder soldar sin la necesidad de otra fuente de energía y aplicando una presión relativamente baja para poder establecer la soldadura (López Gonzáles, 2013), secuencia que se observar en la figura 4-2. Referente a la zona de unión del material se debe decir que la zona afectado por el calor (ZAC) es estrecha y esta compuesta de material deformado plásticamente, en su mayoría (American Welding Society, 1975). La FRW por sus siglas en ingles (*Friction rotary welding*) fue desarrollada por Trevor Inving Rolt en el año de 1836 (Angamarca Pupiales y García Claudio, 2018), desde entonces a seguido en un constante desarrollo e innovación, tanto así, que en la actualidad se encuentra dentro de la industria automotriz, aeroespacial, química, transporte, de construcción, entre otras.

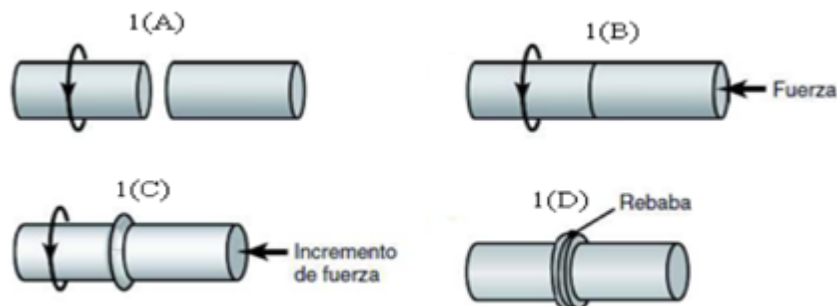


Figura 6-2: Proceso básico de la soldadura por fricción.

Fuente: (Villarreal Guzmán, 2007)

2.5.1. Factores que influyen en la soldadura

Los siguientes 5 factores influyen de manera directa en la calidad de la soldadura por fricción, por lo cual deben ser controlados para asegurar una alta calidad (López Gonzáles, 2013):

- Velocidad de rotación.
- Presión aplicada (en fricción y forja).
- Temperatura de las superficies.

- Propiedades del material.
- Estado de las superficies de contacto.

La combinación adecuada de estas variables asegurara la calidad de la soldadura, y esta solo se logra con el operador realizando pruebas preliminares hasta encontrar la combinación para el material con que se este trabajando; se debe concentrar en los primeros 3 parámetros, ya que son los únicos que se puede variar, debido a que los restantes son propiedades exclusivas del material.

2.5.2. Etapas del proceso de soldadura

El proceso de soldadura tiene varias etapas desde el contacto entre las dos piezas, la aplicación de presión hasta superar el enfriado y el endurecimiento; no se tomará en cuenta la entapa inicial donde la pieza de revolución alcanza la velocidad requerida.

2.5.2.1. Etapa I: Fricción

En esta etapa las caras de la probeta entran en contacto, se aplica presión al proceso además se alcanza la energía necesaria para realizar la soldadura; debido a las acciones que se realiza y con el fin de identificar los procesos que ocurren se dividió en dos a esta etapa:

2.5.2.1.1. Contacto inicial

En esta fase se genera el calor necesario para la fase de forjado, esto ocurre al poner en contacto ambas piezas y hacer girar una de ellas generando un calentamiento por fricción(American Welding Society, 1975) e incrementando el torque friccional que tendrá que ser minimizado mediante la aplicación de una fuerza axial progresiva en esta y la siguiente parte, esto lleva a una disminución en la aceleración y un brusco crecimiento de la energía almacenada. En las caras en contacto se elimina toda irregularidad presente en sus superficie, la aplicación de la fuerza de fregado que es una fuerza axial baja que permite un contacto casi perfecto, es decir que todos lo puntos de ambas superficies estarán en contacto con sus similares de la superficie opuesta, estas acciones conllevan a la creación de un capa plastificada (Chávez Sarango, 2017),

2.5.2.1.2. Transición

La presión axial es aumentada desplazando el material plastificado para mantener una zona afectada por el calor estrecha. En este punto el calor aumenta considerablemente en los metales generando una fuerte adhesión en las superficies lo que transfiere material entre ellas (Angamarca Pupiales y García Claudio, 2018). Además, es visible la disminución de la velocidad de rotación, un crecimiento en el diámetro de la junta por el material plastificado y el cambio de color debido a la elevación de temperatura.

2.5.2.2. Etapa II: Forja

Se reduce la velocidad de rotación, en conjunto se debe aplicar una presión axial llamada presión de forjado necesaria para desplazar el material plastificado generando una onda o rizo en junta y produce otro pico de par de torsión que disminuirá a medida que se reduzca la velocidad (Angamarca Pupiales y García Claudio, 2018). Se piensa que la microestructura final de la junta es refinada por el aumento en el par de torsión además del calor que llega a su punto máximo. En esta etapa se terminan de eliminar impurezas, inclusiones y óxidos existentes en las superficies (Chávez Sarango, 2017). Esta etapa termina cuando la velocidad es igual a cero y las dos piezas están unidas sin haber dejado de aplicar la presión de forjado.

En la figura 7-2 se observa estas etapas lo cual ayuda a entender mejor el proceso de soldadura por fricción rotacional.

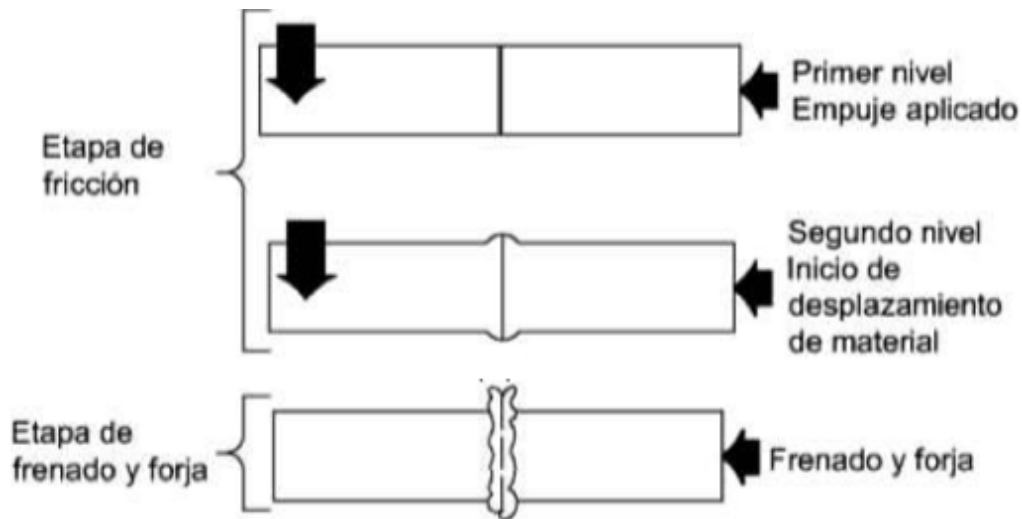


Figura 7-2: Etapas del proceso de soldadura por fricción

Fuente: (Angamarca Pupiales y García Claudio, 2018).

2.6. Zonas afectadas por el calor

Al ser un proceso de soldadura existe zonas alrededor de la unión que debido al calor del proceso van a presentar cambios en su propiedades químicas y físicas, estas cambiarán dependiendo de la cercanía que se encuentre a las superficies en contacto. Las zonas que se encuentran serán divididas desde las superficies opuestas que interactúan serán las siguientes y se observa en la figura 8-2 (Toapanta Bautista, 2015; Villarreal Guzmán, 2007):

- Metal base (MB).** Se refiere a la zona más alejada de la junta, la que no ha sido afectada por deformación plástica o calor, es decir, sus propiedades químicas y mecánicas permanecen igual que al principio del proceso.

- b) **Zona afectada térmicamente (ZAT).** Es la zona junto al MB, la cual, si ha sido alcanzada por el calor del proceso, pero no presenta deformaciones plásticas y podría llegar a tener cambios en su microestructura.
- c) **Zona afectada térmica y mecánicamente (ZATM).** Esta es propia de esta soldadura, aquí se puede visualizar deformación plástica debido a las altas temperaturas, además de cambios en las propiedades y en la microestructura. No es posible una recrystalización dinámica de la microestructura.
- d) **Zona de contacto (ZC) o mezclado.** Es la zona de recrystalización dinámica (consiste en la nucleación de nuevos granos durante la deformación (Reyes Osorio, 2013)), en esta zona ocurre la fricción generando el calor del proceso, la deformación plástica, además se transfieren fragmentos de metal entre las superficies en contacto.

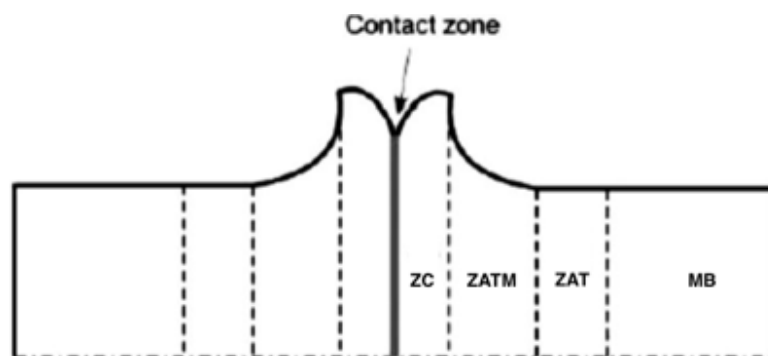


Figura 8-2: Zonas afectadas por el calor en una junta por FWSR

Fuente: (Villarreal Guzmán, 2007).

2.7. Métodos de entrada de energía

En el proceso de soldadura de fricción se puede identificar dos métodos de entrada de energía, la una utiliza la energía continua del motor y el otro método la energía almacenada en un volante de inercia.

2.7.1. Soldadura por fricción por inercia

El método de entrada de energía de soldadura por fricción por inercia (*Inertia - Drive friction rotary welding*) consiste en que la parte móvil del proceso este unida a un husillo que tiene uno o más volantes fijados mecánicamente. El husillo gira a una velocidad requerida almacenando energía cinética. Alcanzada la velocidad requerida el sistema de accionamiento se desacopla, dejando al volante girar solo por inercia, además se debe aplicar una presión axial constante para que las superficies se rocen que sería la fuerza de fricción, esta a su vez reduce la velocidad de rotación, identificada una desaceleración considerable se aplica o no la presión de forja, dejando que el proceso termine a una presión constante (American Welding Society, 1975; López Gonzáles, 2013).

En la figura 9-2 se observa el proceso de esta soldadura, de igual modo la relación que tiene la velocidad de rotación en la etapa con la fuerza/etapa que se aplique/encuentre, la tabla 11-2 consta de las principales características de la influencia de las variables velocidad, presión axial y tamaño del volante en este proceso de aporte de energía.

Tabla 11-2: Influencia de las variables en el proceso de soldadura por ficción inercial

Variable	Características
Velocidad perimetral	<p>Dependiendo del material existe una velocidad mínima para que la soldadura sea satisfactoria.</p> <p>Para aceros de bajo carbono la velocidad de referencia es 1,5 m/s, menores presenta los bordes uniformes y en el centro borroso semejante a un reloj de arena. A velocidades mayores el grosor es uniforme en toda la pieza.</p> <p>Velocidades superiores a 5 m/s en el centro se vuelve más gruesa la junta.</p> <p>En aceros para herramientas se debe trabajar con velocidades superiores a 1,8 m/s</p>
Presión axial	<p>Influye en el ancho de la zona afectada por el calor, a más presión mayor zona. El tiempo de soldadura también varía dependiendo la presión, disminuye a mayor presión.</p> <p>Esta relacionada inversamente a la velocidad perimetral y directamente con respecto al acabado de la junta, es decir, a menor presión mejor acabado.</p>
Tamaño del volante	<p>La capacidad de potencia del volante está limitada sólo por la velocidad a la que puede ser retardado.</p> <p>Es el encargado de suministrar la fuerza de torsión, por consiguiente, si el material es difícil de soldar se necesita un gran volante.</p> <p>Proporcionar la energía si el volante cumple con el aporte de energía mínimo, si excede el tamaño no afecta la calidad de la junta su exceso de energía se ve reflejado en la cantidad de rebabas.</p>

Fuente: (American Welding Society, 1975; López Gonzáles, 2013).

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021

Las características de las variables son el resultado de experimentos realizados en los cuales se modificaba los parámetros, mismo que ayudaron a estructurar la figura 9-2.

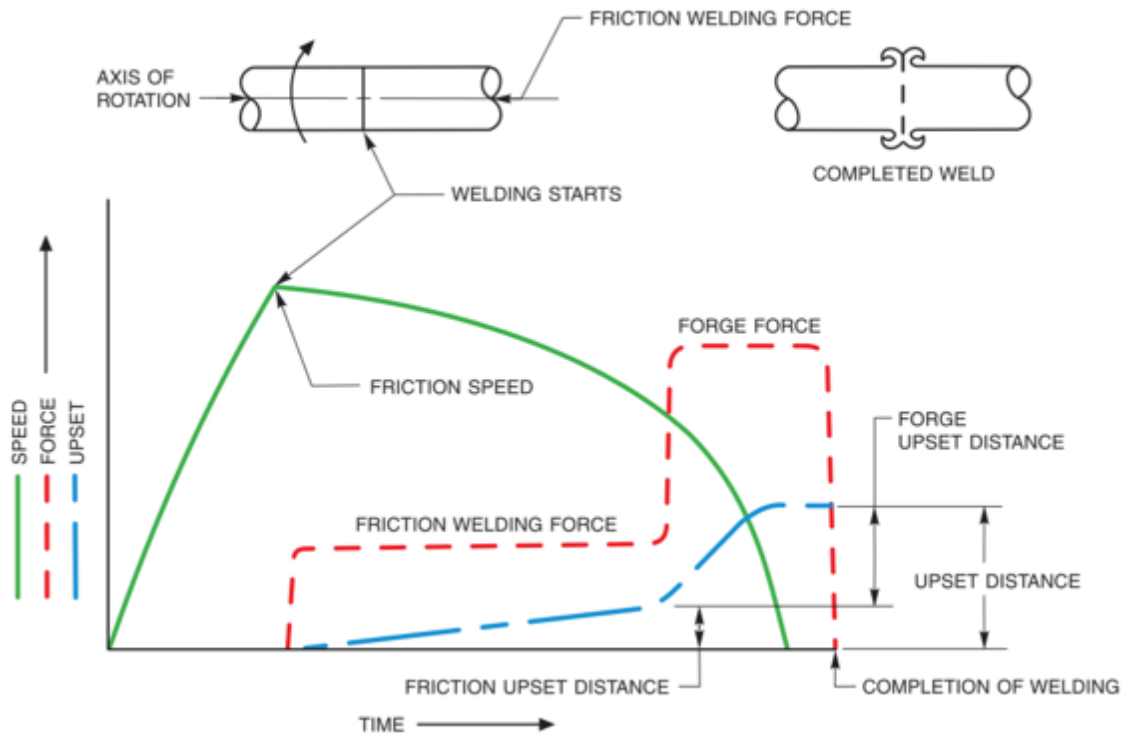


Figura 9-2: Características y parámetros de la soldadura por fricción por inercia

Fuente: (American Welding Society, 1975).

2.7.2. Soldadura por fricción directa.

En este tipo soldadura la parte móvil debe constar con una probeta sujeta a un mandril que a su vez este accionado por un motor, la otra pieza permanece estática. El proceso consiste en aplicar una velocidad constante durante un tiempo determinado (contacto inicial o calentamiento) hasta alcanzar la cantidad de calor necesaria para unir las probetas. Alcanzada esta energía se interrumpe la fuerza motriz de rotación con el fin de detener y que ambas probetas se mantengan unidas, esto se logra aplicando una fuerza de frenado que puede ser mecánico o eléctrico. Para seguir con el proceso se debe aplicar la presión de forjado durante el tiempo establecido. La relación de estos parámetros se puede visualizar en la figura 8-2.

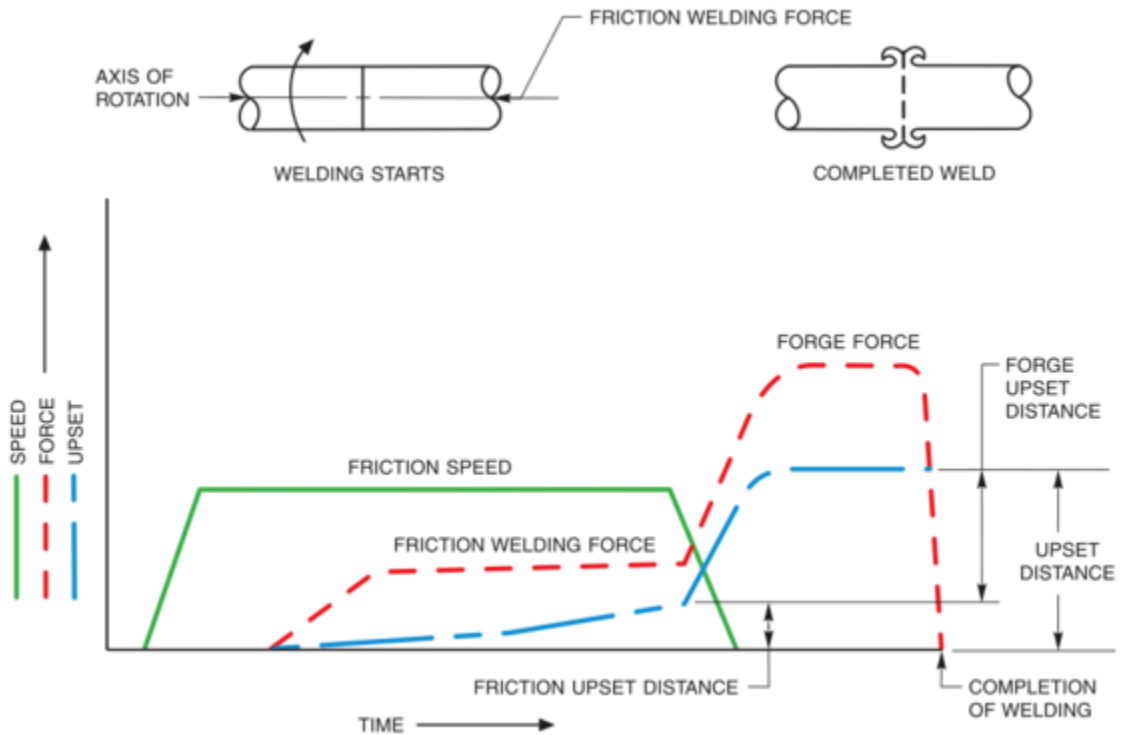


Figura 10-2: Características y parámetros de la soldadura por fricción directa

Fuente: (American Welding Society, 1975)

2.7.2.1. Relación de las variables

La velocidad rotacional, la presión de rozamiento y de forja, la temperatura que alcanza y los tiempos de aplicación de las presiones son variables de se debe tener muy en cuenta, ya que estas determinaran la calidad de la soldadura y de la junta, debido a esto en la tabla 9-2 se detalla sus características y la manera que influyen.

Tabla 12-2: Influencia de las variables en el proceso de soldadura por ficción directa

Variable	Características
Velocidad rotacional	<p>La velocidad influye de manera directa en la temperatura que alcance el material variando la zona afectada por el calor.</p> <p>El intervalo de velocidad recomendado es 1,3 a 1,8 m/s, velocidades bajas no son recomendadas debido a que se trabaja con pares altos y las velocidades altas amplían la zona afectada por el calor.</p> <p>En caso de trabajar con metales disímiles se recomienda variar este parámetro antes que los demás, debido a su alta influencia.</p>
Presión axial	<p>Al igual que la velocidad influye en la temperatura de junta, el desplazamiento axial (rebabas) además del par del motor y la potencia para el husillo, ya que, si es demasiada la probeta no podrá girar con lo que hará que el motor llegue</p>

	<p>a fallar. Por esta razón se debe asegurar que las presiones a trabajar sean reproducibles.</p> <p>La cantidad de presión necesaria para el proceso también está relacionado con la geometría y el material.</p> <p>Se debe recordar que existe una presión de fricción y una de forja; si es aplicada correctamente mantendrá las superficies de contacto en una unión íntima igualmente evitará una contaminación atmosférica y la oxidación.</p> <p>Una alta presión se evidencia en la rebaba debido a que esta muy pronunciada.</p>
<p>Tiempo de calentamiento</p>	<p>Aunque es un parámetro muy importante a considerar este depende directamente de la velocidad de rotación y de la presión.</p> <p>Tener un tiempo de calentamiento prolongado ayuda a que ingresa más energía, disminuyendo la velocidad de enfriamiento, además de disminuir el agrietamiento por enfriamiento</p> <p>El tiempo de calentamiento (fricción) determina la cantidad de energía que estará presente en el proceso, al mismo tiempo esta relacionada inversamente con presión de fricción.</p>

Fuente: (American Welding Society, 1975; López Gonzáles, 2013).

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021

En la figura 11-2 se visualiza la relación que existe entre las variables velocidad de rotación, presión axial y tiempo de calentamiento, teniendo como referencia velocidades de 975 y 1820 rpm, estas tablas ayudan a comprender de mejor manera y confirma las relaciones directa o inversa entre variables además de confirmar las características anotadas en la tabla 12-2.

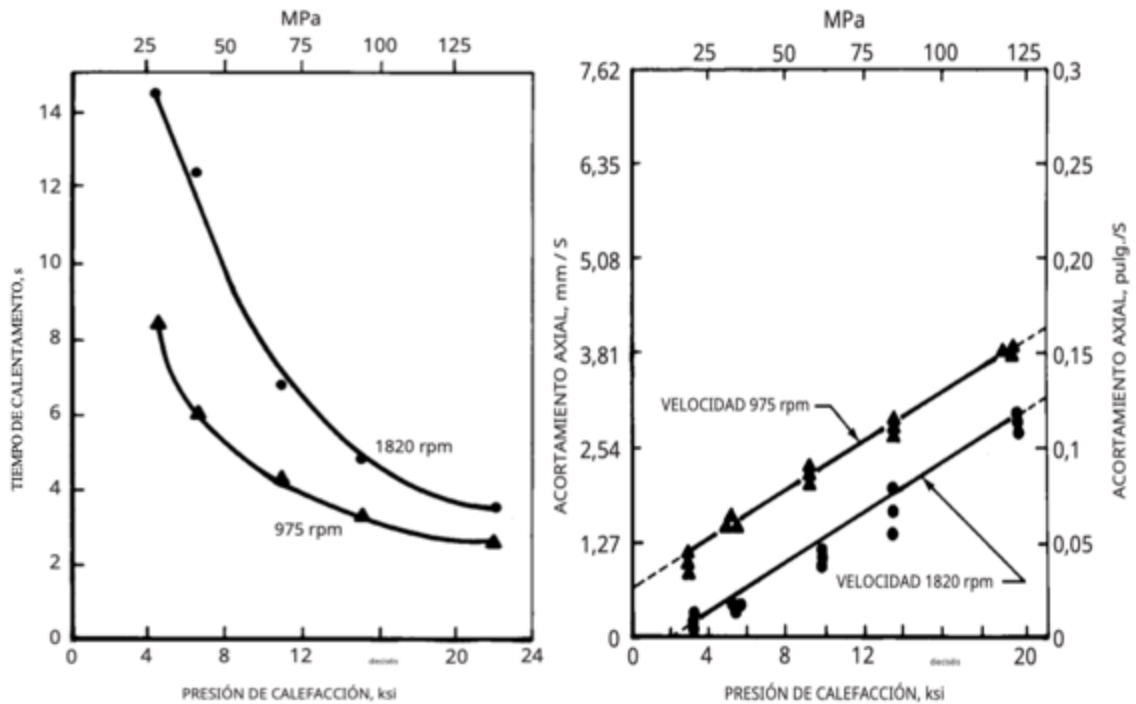


Figura 11-2: Relación tiempo de calentamiento y presión de calefacción (izq), relación acortamiento axial y presión de calefacción (der)

Fuente: (American Welding Society, 1975).

2.8. Soldabilidad

En la figura 12-2 se presenta una matriz de materiales metálicos, cerámicos y plásticos de la AWS que indica cuales se pueden unir por soldadura por fricción rotacional, con indicador de colores donde el celeste representa la mejor unión, el amarillo indica la viabilidad de la soldadura, pero no se obtendrán las mejores juntas y los espacios en blanco que estos materiales no se pueden ni se recomienda soldar entre ellos. Esta matriz debe ser usada solamente como una guía ya que la soldabilidad también depende de la composición de la aleación, las variables del proceso, el tipo de junta y las especificaciones del tipo de servicio que vaya a realizar (American Welding Society, 1975).

	Aleaciones de circonio	Material de la válvula (automotriz) Vanadio	Uranio	Tungsteno cementado con carabina de tungsteno	Aleaciones de titanio	Titanio	Torio	Tantalio	Aceros, Inoxidable	Aceros, Sinterizados	Aceros, Maraging	Aceros, mecanizado libre	Aceros, Carbono	Aceros, Aleación	Aleaciones de plata	Plata	Aleaciones de niobio	Niobio	Nimonic	Aleaciones de níquel	Níquel	Monel	Molibdeno	Aleaciones de magnesio	Magnesio	Dirigir	Hierro sinterizado	Níquel de cobre	Cobre	Columbio	Cobalto	Cerámico	Hierro fundido	Carburos cementados	Bronce	Latón	Aleaciones de aluminio	Aluminio														
Aluminio	■																																																			
Aleaciones de aluminio																																																				
Latón																																																				
Bronce																																																				
Carburos cementados																																																				
Hierro fundido																																																				
Cerámico																																																				
Cobalto																																																				
Cobre	■																																																			
Níquel de cobre																																																				
Hierro sinterizado																																																				
Dirigir																																																				
Magnesio																																																				
Aleaciones de magnesio																																																				
Molibdeno	■																																																			
Monel																																																				
Níquel																																																				
Aleaciones de níquel																																																				
Nimonic																																																				
Niobio																																																				
Aleaciones de niobio																																																				
Plata																																																				
Aleaciones de plata																																																				
Aceros, Baja Aleación																																																				
Aceros, Carbono																																																				
Aceros, mecanizado libre																																																				
Aceros, Maraging																																																				
Aceros, Sinterizados																																																				
Aceros, Inoxidable																																																				
Aceros, Herramienta																																																				
Tantalio																																																				
Torio																																																				
Titanio																																																				
Aleaciones de titanio																																																				
Tungsteno																																																				
Carburo de tungsteno, uranio cementado																																																				
Vanadio																																																				
Material de la válvula (automotriz)																																																				
Aleaciones de circonio																																																				

■ Unión metalúrgica de fuerza total. (En algunos casos, puede ser necesario un tratamiento térmico posterior a la soldadura para lograr la resistencia total de la soldadura).

■ Se puede unir mediante soldadura por fricción, pero no producirá una unión de fuerza completa.

Figura 12-2: Soldabilidad de metales, cerámicos y plásticos

Fuente: (American Welding Society, 1975).

2.9. Selección de parámetros

Al ser un proceso de interés dentro de la industria industrial, automotriz, entre otras se ha ido realizando con diferentes materiales como acero de bajo, medio y alto carbono, además de inoxidables, aluminio, cobre y sus aleaciones; en la tabla 13-2 se observa diferentes aceros con la velocidad, fuerza y tiempo con los que se obtuvo una excelente soldadura y que permite tener otra guía de referencia para determinar los valores de las variables que se va a manejar (López Gonzáles, 2013).

Tabla 13-2: Parámetros de soldadura para aceros en barra de 25 mm de diámetro

Metales	Velocidad RPM	Fuerza axial KN	Material perdido mm	Tiempo s
Acero SAE 1018	4600	53	2,5	2
Acero SAE 1045	4600	62	2,5	2
Acero SAE 4140	4600	67	2,5	2
Acero inoxidable martensítico	3000	90	2,5	2,5
Acero inoxidable 410	3000	80	2,5	2,5
Acero inoxidable 302	3500	80	2,5	2,5

Fuente: (López Gonzáles, 2013).

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021

2.10. Ensayo no destructivo

2.10.1. Inspección visual

La inspección visual es un método de inspección simple y económica que revela los defectos en una superficie soldada para lo cual es necesaria una persona capacitada. La persona encargada de realizar la inspección debe tener agudeza visual y equipos como: equipo de medición para altas temperatura y equipos de medición de la precisión deseada (American Welding Society, 2015). Este ensayo al identificar discontinuidades descarta las juntas en mal estado (mal acabado) permitiendo así continuar con los ensayos destructivos en este caso con el ensayo de dureza.

Este ensayo tiene operaciones que se deben realizar antes, durante y después de la soldadura; se detallará acciones que son válidas para el proceso de soldadura para esta investigación:

Antes de la soldadura

- Examinar el estado del material base.
- Examinar el acoplamiento de las probetas en los mecanismos de sujeción.
- Examinar la alineación de las probetas.

Durante la soldadura

- Comprobar que las temperaturas estimadas sean alcanzadas.

Después de la soldadura

- Examinar la calidad de la superficie de la soldadura, esto es, revisar que no exista porosidad, fusión incompleta, grietas y exceso de refuerzo.
- Comprobar si cumple con las dimensiones de tamaño, longitud y ubicación de la soldadura.
- En caso que se vaya a continuar realizando procedimientos se debe revisar las especificaciones determinadas.

2.11. Ensayos destructivos

2.11.1. Dureza de los aceros

Es una propiedad mecánica de los aceros que mide la resistencia del material a ser penetrada o rayada por un esfuerzo puntual ejercido por un objeto que no se deforma (Aristizabal Castrillón y Manrique Torres, 2017; Díaz del Castillo y Reyes Solís, 2012). La dureza se obtiene al indentar un penetrador sobre la superficie del material, normalmente con forma de bola, pirámide o cono dependiendo del tipo de dureza que se este calculando; los penetradores están fabricado de acero templado, diamante o carburo de tungsteno materiales más resistentes que el material base. Al ser ensayos normalizados la presión que se aplica en el penetrador esta regulada, misma que mediante el remplazo de valores en la fórmula correspondiente junto con los valores de la medición de la indentación, se conocerá el valor de la dureza (Ruiz, 2006). Por lo ende, mientras más pequeña sea la huella dejada por el penetrador mayor dureza tendrá el material ensayado.

2.11.2. Ensayos para la obtención de dureza

Dentro de los ensayos de materiales existen de diferentes clases como son los científicos, técnicos, químicos, físicos, destructivos y no destructivos por nombrar los más utilizados; siendo los 2 últimos ensayos los que ayudan a calcular la dureza del material. Para estos ensayos se utiliza ultrasonido, escleroscopio o durómetro dependiendo del tipo. Los ensayos que determinaran la dureza de los aceros en este caso serán los destructivos que tiene como característica destruir la probeta o desecharla luego de ser utilizada en el ensayo (Aristizabal Castrillón y Manrique Torres, 2017).

Los ensayos de dureza tienen como principio la aplicación de una carga perpendicular a un indentador a la menor velocidad que sea posible para que el ensayo se considere estático y no influya en el cálculo, el indentador penetra en una superficie del material previamente trabajada con un acabado tipo espejo durante un lapso tiempo predeterminado, el proceso se realiza con el fin que el material del indentador raye y deforme plásticamente el material de la probeta. Dependiendo el tipo de ensayo se mide el área proyectada la impresión, la profundidad de impresión o el área superficial de la impresión que dejo el indentador; seguido de la obtención de la medida se debe multiplicar por el factor de dureza correspondiente (Aristizabal Castrillón y Manrique Torres, 2017).

Es importante determinar la dureza del material en la industria del acero esto ayuda a controlar la calidad del producto además que los ensayos son de simple aplicación, de bajo costo y en caso de ser un ensayo destructivo basta con una muestra del material para encontrarlo. Además, se puede calcular la resistencia a la tensión mediante una correlación directa que existe con la dureza.

2.11.3. Tipos de ensayos de dureza

Se dividen en dos grupos dependiendo la carga que se aplica; los de microdureza que manejan cargas entre 1 y 1000 gf debido a esto son utilizados para la determinación de dureza de materiales cerámicos y los de macrodureza se refieren a los ensayos que se aplica una carga mayor 9,807 N o 1000 gf aquí se encuentra los ensayos Vickers, Brinell y Rockwell que a su vez son los más utilizados en la industria de metal (Aristizabal Castrillón y Manrique Torres, 2017). Cada uno de los ensayos entrega la dureza en su propia escala y esas pueden relacionarse con la tabla de conversión de la norma ASTM E140.

En la tabla 14-2 se observa la descripción del ensayo y la norma que se debe utilizar para realizarlo correctamente.

Tabla 14-2: Tipos de ensayos de dureza

Ensayo	Descripción	Norma
Ensayo Brinell	Utiliza un indentador esférico de acero o de carburo de wolframio con una carga y tiempo determinado. Tiene una dureza máxima de 650 HBW. Recomendado para materiales forjados o de fundición.	ASTM E10 - <i>Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Metals.</i> (ISO 6506, JIS Z 2243)
Ensayo Rockwell	El indentador tiene forma de como diamante o de esfera de carburo de diamante o tungsteno dependiendo el tipo. Tiene 7 niveles este ensayo cada uno con su escala y aplicación.	ASTM E18 - <i>Standard Test Method for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Metals.</i> (ISO 6508, JIS Z 2245)
Ensayo Vickers	El indentador tiene una forma de pirámide de diamante con un ángulo de 136°. Con el ensayo Knoop difieren en el ángulo de la pirámide que varía entre los 172° y 130°. Se debe medir el área resultante causada por el indentador en la probeta en mm ² .	ASTM E384 - <i>Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials</i> (ISO 6507 y JIS Z 2244)

Fuente: (Struers, 2020a; 2020b).

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021

En la figura 13-2 se observa la forma del penetrador, las dimensiones de la proyección que se deben tomar, la carga y la formula que se debe aplicar para encontrar la dureza.

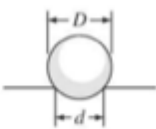

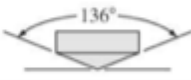

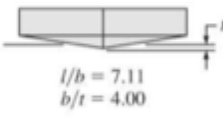
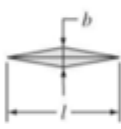
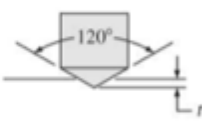

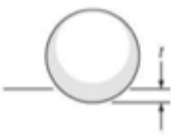

Ensayo	Penetrador	Forma del penetrador		Carga	Fórmula del número de dureza
		Vista lateral	Vista en planta		
Brinell	Esfera de 10 mm fabricada de acero o carburo de wolframio			P	$BHN = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickers	Pirámide de diamante			P	$VHN = \frac{1.72P}{d_1^2}$
Microdureza Knoop	Pirámide de diamante			P	$KHN = \frac{14.2P}{l^2}$
Rockwell					
A } C } D }	Cono de diamante			60 kg $R_A =$ 150 kg $R_C =$ 100 kg $R_D =$	100-500f
B } F } G }	Esfera de acero de 1/16 pulgadas			100 kg $R_B =$ 60 kg $R_F =$ 150 kg $R_G =$ 100 kg $R_E =$	
E	Esfera de acero de 1/8 pulgadas				

Figura 13-2: Tipos de ensayos de dureza

Fuente: (Smith y Hashemi, 2014).

2.12. Caracterización metalográfica

La metalografía se encarga de estudiar las características estructurales, las propiedades físicas y mecánicas, de igual manera mediante la aplicación de diversos procesos se puede obtener el tamaño de grano, distribución de fases y si fue aplicado algún tratamiento térmico mediante una microfotografía a diferentes niveles de aumento (Lozano Guamán, 2018).

Por consecuencia la caracterización metalográfica es el estudio a un nivel microscópico de un acero con el propósito de visualizar e identificar su microestructura y las fases cristalinas como base en la mayoría de los estudios de ahí si el estudio lo necesita se puede seguir con las demás propiedades y características. El éxito y confianza de este estudio esta relacionado con el cumplimiento de la norma ASTM E-3, misma que detalla la manera correcta de preparar las muestras removiendo las imperfecciones e impurezas con un lijado, luego es importante realizar un pulido hasta obtener un acabado de la superficie tipo espejo (Silva Quintero y Idrovo Tituaña, 2019).

2.12.1. Preparación de la probeta

Consiste en detallar los pasos que son necesarios seguir para realizar un análisis correcto. A continuación, el procedimiento para la observación de muestras en el microscopio; esta dividida en varias etapas que van desde la obtención de una parte del material a analizar hasta la selección de la aplicación necesaria.

2.12.1.1. Selección y extracción de la muestra

Debido a los diversos usos de los aceros existe una variedad de geometrías (tubos, planchas y ejes), dependiendo cual este usando es necesario seleccionar una zona sin mucha deformación con el objetivo de tener una superficie plana. La superficie de la muestra no tiene medidas establecidas, pero se recomienda que tenga un área mínima para el pulido de 20 mm², además el tamaño debe permitir su fácil manipulación y traslado. En referencia al corte se debe tener en cuenta que el rozamiento va a general un incremento en la temperatura del acero, con el fin de impedir que esta afecte la microestructura el corte se debe realizar con algún tipo de líquido refrigerante (Llulluna Llumiuinga, 2014).

En caso de que el tamaño de la muestra no sea el adecuado para la manipulación se puede introducir un paso adicional (solo de ser necesario) denominado montaje, en el cual se agrega material adicional como el polímero, baquelita o resina en moldes con la muestra para mejorar su agarre.

2.12.1.2. Desbaste

Se realiza en dos etapas, la primera el objetivo remover las rebabas, rayaduras e imperfecciones, así mismo de lograr un plano nivelado para los siguientes pasos; se utiliza papeles abrasivos al agua desde la numeración 80 hasta la 240 cambiando cuando toda la superficie haya sido desbastada uniformemente por la lija. La segunda etapa consiste en realizar el mismo procedimiento de desbastado con lijas de numeración 320 hasta 2500, las lijas crearán una nueva superficie con deformaciones menos profundas y severas que en la etapa anterior facilitando el proceso de pulido. En ambos casos se debe mantener un flujo de agua constante además de una presión uniforme en la probeta para obtener una superficie nivelada y girar 90° en el eje perpendicular a superficie de apoyo a la probeta cada cierto tiempo es evitar que las deformaciones sean muy profundas.

2.12.1.3. Pulido

Para el pulido se utiliza un paño y de abrasivo alúmina de 1 micrón y de 0,3 micrón diluida en agua, la primera solución eliminará las deformaciones más profundas que presenta la superficie de la probeta mientras que la de 0,3 micrón eliminará las restantes deformaciones consiguiendo dejar un acabado tipo espejo permitiendo ver de una manera nítida la microestructura. En la figura

14-2 se visualiza las capas/superficies de deformación que se debe desbastar y pulir hasta llegar a la microestructura.

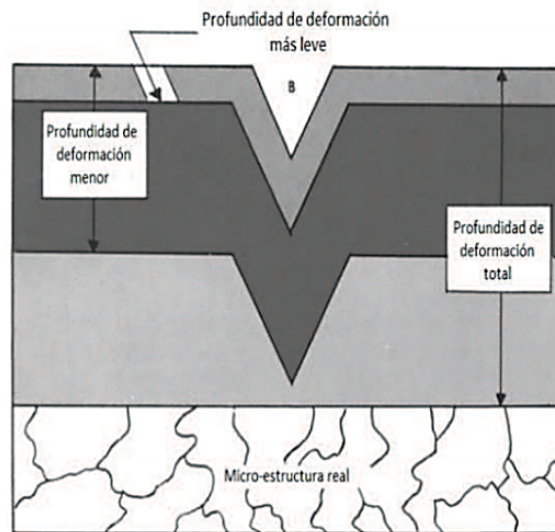


Figura 14-2: Forma esquemática del desbaste

Fuente: (Lulluna Llumiuinga, 2014).

2.12.1.4. Ataque químico

El ataque químico no es más que una corrosión controlada que se produce en la superficie pulida de la probeta, debido a la reacción química que ocurre con la ferrita y perlita, revelando así los límites de grano y la microestructura (Lulluna Llumiuinga, 2014). Este paso es el de mayor importancia de la metalografía pues si no se selecciona el adecuado reactivo basándonos en el acero de la probeta no serán visibles sus características (Chávez Sarango, 2017). Para el proceso se debe poner en contacto la solución con la superficie, esperar el tiempo que especifique el reactivo después detener el ataque con agua y observar la superficie. Si el ataque no fue exitoso se debe volver a pulir con la alúmina de 0,3 micrón, y repetir el proceso hasta que la superficie este bien atacada (Guzmán Romero, 2017). Los reactivos más comunes para aceros se muestran en la tabla 15-2.

Tabla 15-2: Tipos reactivos

Solución	Composición	Efecto
Pical	Ácido pícrico 4 g Alcohol etílico 100 ml	Revela límites de grano de austenita en estructuras martensítica, ferrita y perlita.
Nital 5%	Ácido nítrico 5 ml Alcohol etílico 110 ml	Realza la interfase entre carburos y en la matriz de ferrita-perlita
Vilella	Ácido clorhídrico 5 ml Ácido pícrico 1g Etanol 100 ml (95%)	Muy efectivo para revelar los bordes de grano. Su tiempo de espera es de 15 minutos min.

Fuente: (Lulluna Llumiuinga, 2014).

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

Este capítulo presenta el material, equipos, reactivos y el procedimiento para realizar el ensayo de dureza según la norma correspondiente para trazar el perfil de dureza, además de realizar la evaluación metalográfica de las juntas soldadas por fricción rotacional.

3.1. Materiales

Explica el procedimiento para obtener los tres grupos de probetas de acero a partir de las barras compradas hasta que están listas para soldarse.

3.1.1. Probetas

Se mecanizó dos tipos de probetas (para mandril y cabezal móvil) con el propósito de analizar el comportamiento del acero inoxidable AISI 304 (austenítico), AISI M303 (martensítico) y un acero al cromo AISI 4140 al ser soldados por fricción rotacional, se utilizó barras con una longitud de 3000 mm de largo y 15,2 mm, 20 mm y 20,5 mm de diámetro respectivamente. Estos materiales se adquirieron en el establecimiento PROVEEDORA INDUSTRIAL de la ciudad de Riobamba que distribuye estos productos de la comercializadora IVAN BOHMAN C.A.



Figura 1-3: Barras de acero AISI 304, AISI M303 y AISI 4140

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

3.2. Proceso de soldadura

La figura 2-3 muestra el procedimiento que se debe seguir para realizar el ensayo de soldadura por fricción rotacional y su posterior análisis.

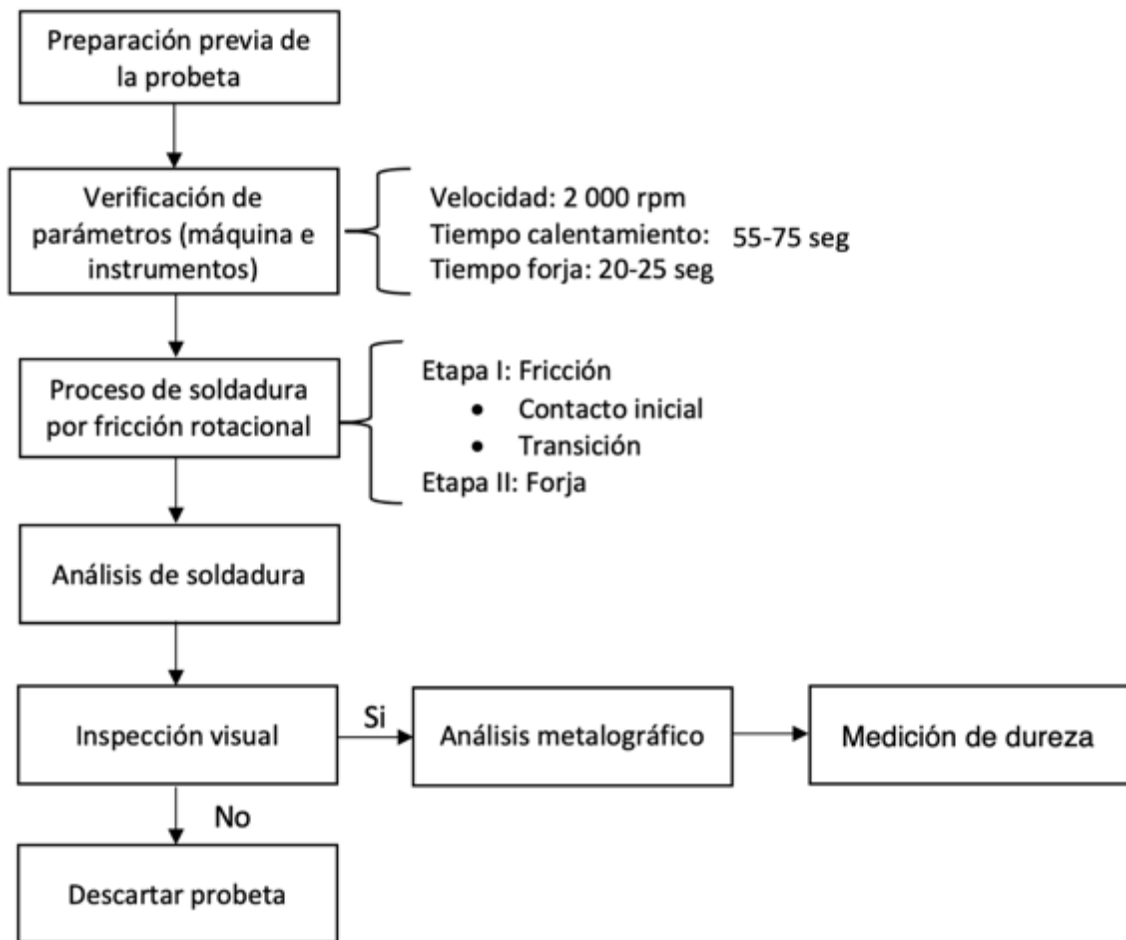


Figura 2-3: Esquema del proceso de soldadura por fricción para aceros AISI 304, AISI M303 y AISI 4140

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

Para el proceso de soldadura por fricción la tabla 1-3 contiene los parámetros detallados que se utilizó:

Tabla 1-3: Parámetros del proceso de soldadura por fricción rotacional

Junta	Velocidad	Tiempo de fricción	Tiempo de forja
AISI 304 - AISI 304	2000 rpm	55– 60 seg.	20 – 25 seg.
AISI M303 - AISI M303	2000 rpm	65 – 70 seg.	20 – 25 seg.
AISI 4140 - AISI 4140	2000 rpm	70 – 75 seg.	20 – 25 seg.
AISI 304 - AISI M303	2000 rpm	65 – 70 seg.	20 – 25 seg.
AISI 304 - AISI 4140	2000 rpm	70 – 75 seg.	20 – 25 seg.
AISI M303 - AISI 4140	2000 rpm	70 – 75 seg.	20 – 25 seg.

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

Dentro de este proceso existe actividades que se deben realizar a cada grupo de probetas para asegurar el mejor acabado de la junta, que son:

- 1) Mecanizar la probeta, mediante la operación de cilindrado en el CNC se retira la capa superficial de la probeta, en la que se encuentran los posibles contaminantes de la junta, en caso de existir residuos se retira con lija de agua.
- 2) Montar las probetas en el mandril y cabezal móvil del torno según su geometría.
- 3) Alinear los ejes transversales de las probetas.
- 4) Ajustar las probetas verificando siempre la alineación del eje.
- 5) Revisar que no exista material o instrumento en la cercanía de las partes móviles del torno, esto evita accidentes.
- 6) Encender el torno y avanzar el cabezal móvil hasta que las superficies entren en contacto inicial.
- 7) Continuar aplicando más presión axial para completar la transición.
- 8) Aplicar el freno de emergencia, deteniendo el sistema después que en la zona de contacto se haya formado la onda de la junta y continuar aplicando presión para que no exista corte por torsión.

3.3. Parámetros de soldadura

Siendo tres aceros que no tienen investigación previa soldados entres si o disímiles en este tipo de soldadura, se debe empezar variando los parámetros principales hasta encontrar la combinación que proporcione las mejores juntas. Al ser aceros inoxidable y acero al cromo se mantendrá una velocidad de 2000 rpm debido a que velocidades inferiores necesitan mayores tiempos de fricción y forja, además que si estos no son aplicados correctamente existe fusión incompleta perjudicando la resistencia de la junta. Los tiempos de fricción y forja a la velocidad constante antes detallada se muestra en la tabla 1-3; es necesario mantenerlos en estos rangos ya que si se disminuyen de igual manera provoca juntas defectuosas y en el caso de aumentar el calor se transfiere a más volumen afectándolo térmicamente en su microestructura y propiedades físicas, lo cual, hará esta zona más plástica permitiendo su fácil deformación y la onda de la junta crecerá de manera innecesaria.

Para la soldadura común entre acero similares se optó por 2 o 3 pares de probetas para la experimentación inicial debido a que estos van a confirmar los parámetros; realizado el procedimiento de soldadura con los mismos parámetros, se evaluará el estado de la junta mediante inspección visual y se mantendrá o corregirán los parámetros. Para las soldaduras disímiles se utiliza los rangos de tiempos de la tabla 1-3 basándose en las soldaduras anteriores y observado el tamaño de onda que se forma en la zona de contacto.

3.4. Dimensiones de la probeta para soldadura

Debido a la dureza de los aceros anteriormente nombrados se utilizará maquinaria especializada, el primer corte se realizó con amoladora determina la longitud de 80 mm, distancia que al ser

menor no podrá ajustarse en los mandriles y si es mayor provoca pandeo, para evitar la contaminación por algún agente externo presente en la superficie de la probeta en el cordón de soldadura se les mecanizo mediante una operación de cilindrado en el torno CNC con una profundidad de corte de 2 mm. En la figura 3-3 se presentan las dimensiones de los dos tipos de probeta, la superior con una geometría que se ajusta al mandril móvil y la inferior que está diseñada para ser sujeta por el mandril fijo, ambos con un diámetro que depende de la barra de acero que se trabajó; la altura del cilindro de la zona en contacto debe ser de 30 mm puesto que a esta distancia los extremos no son afectados térmicamente manteniéndose así el material base. Debido a la geometría de las dos probetas las barras fueron cortadas mediante un torno CNC de la empresa PROVEEDORA INDUSTRIAL. En caso de existir impurezas o irregularidades se las retira con lija de agua.

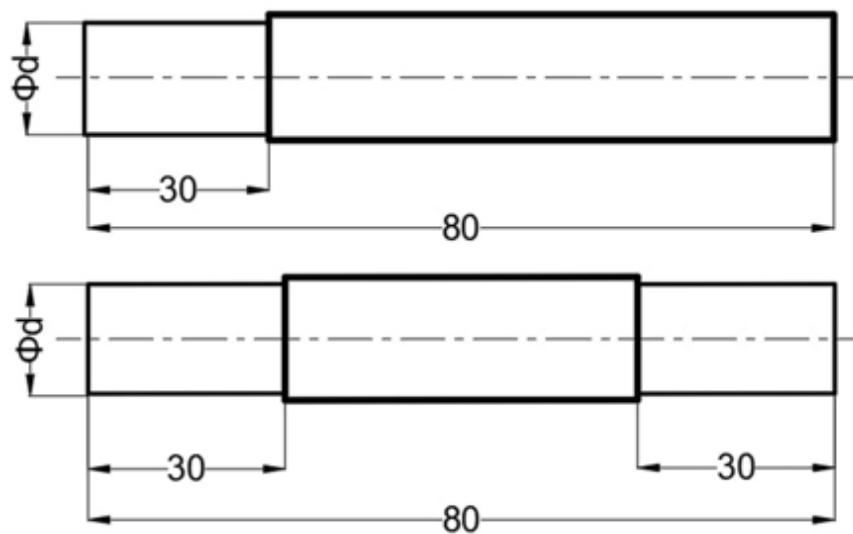


Figura 3-3: Dimensiones de las probetas para soldadura.

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

3.4.1. Codificación de las probetas

Para evitar confusión entre probetas de diferentes materiales se asigna un código que permite evitar este error, por lo cual se asignó la IA para los aceros inoxidable austeníticos, IM para los aceros inoxidable martensíticos y la AC para los aceros al cromo, seguido por las RPM del proceso y el número de probeta. La lectura completa del código se encuentra en la tabla 2-3.

Tabla 2-3: Codificación e interpretación de las probetas.

Designación	Interpretación
IA2000-P01	Aceros inoxidable austeníticos AISI 304, soldadura realizada a 2000 rpm, probeta número 1.
IM2000-P01	Aceros inoxidable martensíticos, soldadura realizada a 2000 rpm, probeta número 1.

AC2000-P01	Aceros al cromo AISI 4140, soldadura realizada a 2000 rpm, probeta número 1.
IA-IM2000-P01	Acero inoxidable austenítico AISI 304 soldado a un acero inoxidable martensítico AISI M303 a 2000 rpm, probeta número 1.
IA-AC2000-P01	Acero inoxidable austenítico AISI 304 soldado a un acero al cromo AISI 4140 a 2000 rpm, probeta número 1.
AC-IM2000-P01	Acero al cromo AISI 4140 soldado a un acero inoxidable martensítico AISI M303 a 2000 rpm, probeta número 1.

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

3.5. Equipos

3.5.1. Torno TOS TRENCIN SN 40B

Para el proceso se utilizó un torno ZMM SLIVEN CU 400x2000, que es una máquina utilizada para mecanizar sólidos de metal mediante el giro de la misma alrededor de su eje de simetría y mediante una herramienta de corte se desprende material en forma de viruta, misma que se desplaza en forma perpendicular o paralela hasta alcanzar la forma y dimensiones deseadas (Mecanizados Cordova, 2015). El torno que se ocupó se encuentra en el taller TECNODISEÑOS ubicado en la parroquia Batzacón de la ciudad de Riobamba, dicho torno se proporcionó la velocidad y presión requerida.



Figura 4-3: Torno ZMM SLIVEN CU 400x2000

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

En la tabla 3-3 se detallan las características técnicas que posee el torno con el que se va a trabajar, mismas debe conocer con la finalidad de estar al corriente hasta donde se puede variar la velocidad y aplicar presión con el fin de variar el área de contacto de las probetas si fuese necesario.

Tabla 3-3: Especificaciones técnicas del centro de mecanizado.

Especificaciones del equipo	Unidades	Valor
Longitud torneable máxima	mm	2 000
Diámetro torneable sobre la bancada	mm	440

Diámetro torneable sobre el carro transversal	mm	230
Velocidad el husillo máximo	rpm	2 000
Potencia del motor	kW	8,5
Longitud del torno	mm	3 435
Ancho del torno	mm	1 185
Altura del torno	mm	1 286
Peso del torno	t	2 560

Fuente: (Machineseeker, 2019).

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021

3.5.2. *Equipo de sujeción de pobretas*

Al ser necesaria una alineación de ejes de revolución entre la pieza rotatoria y la estática, y al ver que las herramientas básicas del torno no permiten tal grado de alineación, se optó por una herramienta que se va a encargar de sostener, sujetar y proporcionar la estabilidad que necesita el proceso, de igual manera permite ser liberada del cabezal móvil una vez deje girar el cabezal fijo para evitar un corte por torsión en la junta recién soldada. La herramienta se puede observar en la figura 5-3.



Figura 5-3: Herramienta de sujeción de pobretas

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

3.6. **Procedimiento de soldadura**

Para realizar una correcta soldadura se estableció los siguientes pasos que ayudarán a entregar la mejor calidad en el cordón de soldadura y del acabado.

3.6.1. *Experimentación inicial*

Al ser materiales que no tienen una guía previa, este es un paso muy importante debido a que proporciona los parámetros con los que se va a realizar la soldadura. Aquí se debe observar el comportamiento de los materiales y como va influyendo la variación de parámetros (velocidad,

presión y tiempo). Una vez establecida la mejor combinación de parámetros que garantice una correcta soldadura se puede proseguir al siguiente paso (American Welding Society, 1975).

3.6.2. Preparación de la superficie

La calidad de la soldadura aumenta exponencialmente si se prepara correctamente las superficies que se van a soldar, es decir, se limpia o se lija el óxido, cascarilla, grasa y aceites, debido a que estos agentes externos en capas gruesas impiden el calentamiento homogéneo (American Welding Society, 1975).

3.6.3. Equipamiento

Se debe verificar que los dispositivos de agarre como las mordazas del mandril sujeten correctamente las piezas, ya que, el deslizamiento o el pandeo de las probetas nos entrega soldaduras defectuosas y en el peor de los casos puede provocar daños en el torno, por esta razón se debe verificar la rigidez de todo el equipo incluida la probeta (American Welding Society, 1975).

3.7. Etapas de soldadura

3.7.1. Etapa I: Fricción

Al estar fraccionado en dos procesos que se enfocan al cambio de temperatura y el calor que se genera al rozar las superficies se evidencia ciertas diferencias.

3.7.1.1. Contacto inicial

El cambio de temperatura del proceso empieza en los 13°C que es la temperatura del acero y aumenta drásticamente en cuestión de segundos. La figura 6-3 muestra el momento que al aplicar fuerza axial la probeta en reposo y la que revoluciona se unen obteniendo el contacto inicial en el que se comienza a crear una capa plastificadora, mientras en la figura 7-3 el cambio de color en las dos probetas es evidente.

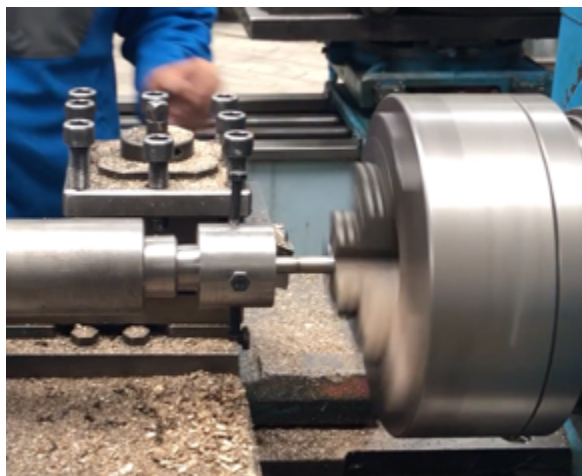


Figura 6-3: Fase de contacto inicial

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

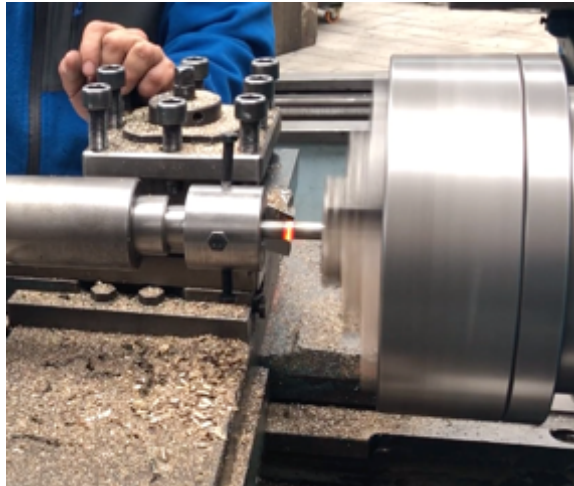


Figura 7-3: Cambio de color en las superficies en contacto

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

3.7.1.2. Transición

En esta fase por la continua aplicación de fuerza axial y que el material está en una zona de plastificación se empieza a desplazar el material de la zona afectada por el calor dejando ver como empieza a crecer el diámetro de la junta. En la figura 8-3 se muestra como una mayor zona ha cambiado de color y la creación del cordón con el material plastificado.

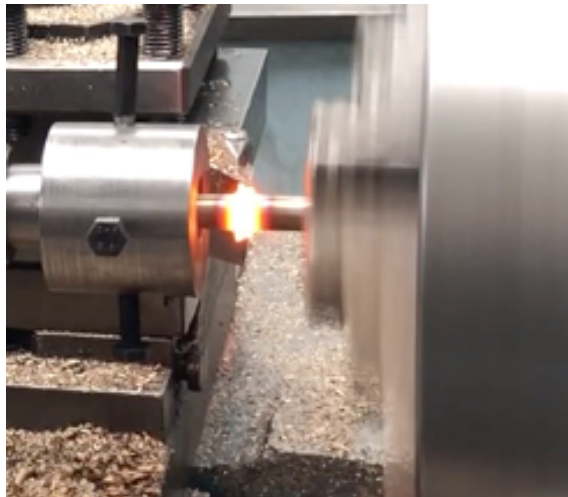


Figura 8-3: Etapa de transición

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

3.7.2. Etapa II: Forja

La constante aplicación de la fuerza axial ha creado una onda en la junta (material desplazado), terminado el tiempo establecido para esta etapa se detiene el torno para que la junta se empieza a plastificar, el color de la junta es menos brillante y no se debe detener el avance axial. La figura

9-3 muestra el cordón de soldadura realizado. En la figura 10-3 se observa como todo el equipo está detenido mientras se espera que la junta se solidifique.

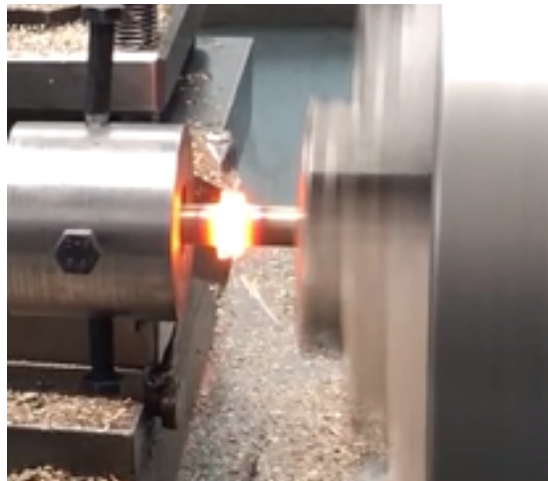


Figura 9-3: Creación del cordón

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

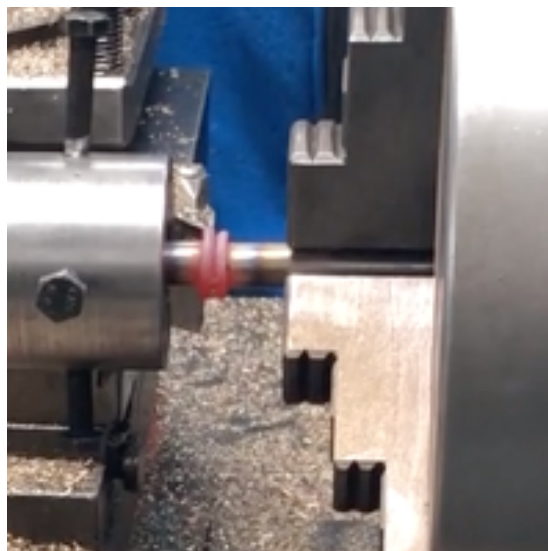


Figura 10-3: Sistema en reposo

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

3.8. Proceso de soldadura

3.8.1. Experimentación inicial

Se realiza pruebas para determinar la combinación adecuada de los parámetros, donde la velocidad se mantendrá constante a 2000 RPM, mientras que se tiempo de calentamiento, tiempo de forja y el avance del cabezal serán los que varíen, estas combinaciones se evidencian en la tabla 4-3. Mientras que en la figura 11-3 se observa las probetas ensayadas.




Figura 11-3: Probetas soldadas en etapa de experimentación

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

Tabla 4-3: Variación de los parámetros del proceso de soldadura por fricción rotacional.

Denominación	Tiempo de calentamiento [seg]	Tiempo de forja [seg]	Resultado de la soldadura.
IA2000-P01	40 – 45	20	
IA2000-P02	40 – 45	20	
IA2000-P03	40 – 45	20	
IM2000-P01	45 – 50	20	
IM2000-P02	45 – 50	20	
AC2000-P01	55 – 60	20	

AC2000-P02	55 – 60	20	
------------	---------	----	--

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

3.8.2. Experimentación final

El análisis final se realizará con el avance adecuado obtenido al final del análisis experimental. En la figura 12-3 se compara visualmente una probeta soldada experimentación inicial y una probeta en experimentación final. En las tablas desde la 5-3 hasta la 10-3 se presentan los ensayos para el análisis final que se realizaron.







Figura 12-3: Probetas ensayadas experimentación inicial (izquierda) y probetas ensayadas experimentación final (derecha)

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

Tabla 5-3: Experimentación final de las probetas de acero inoxidable austenítico AISI





304

Denominación	Tiempo de calentamiento [seg]	Tiempo de forja [seg]	Resultado de la soldadura.
IA2000-P04	55 – 60	20 – 25	

IA2000-P05	55 – 60	20 – 25	
IA2000-P06	55 – 60	20 – 25	
IA2000-P07	55 – 60	20 – 25	
IA2000-P08	55 – 60	20 – 25	

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

Tabla 6-3: Experimentación final de las probetas de acero inoxidable martensítico AISI M303

Denominación	Tiempo de calentamiento [seg]	Tiempo de forja [seg]	Resultado de la soldadura.
IM2000-P03	65 – 70	20 – 25	
IM2000-P04	65 – 70	20 – 25	
IM2000-P05	65 – 70	20 – 25	
IM2000-P06	65 – 70	20 – 25	

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

Tabla 7-3: Experimentación final de las probetas de acero al cromo 4140

Denominación	Tiempo de calentamiento [seg]	Tiempo de forja [seg]	Resultado de la soldadura.
AC2000-P04	70 – 75	20 – 25	
AC2000-P05	70 – 75	20 – 25	
AC2000-P06	70 – 75	20 – 25	
AC2000-P07	70 – 75	20 – 25	
AC2000-P08	70 – 75	20 – 25	

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

Para las soldaduras disimiles únicamente se realizó experimentación final debido al número de ensayos previos realizados, por los cuales ya se contaba con un estibados del tiempo calentamiento y de forja para cada acero.


Tabla 8-3: Experimentación final soldadura disimil aceros AISI 304 - AISI M303

Denominación	Tiempo de calentamiento [seg]	Tiempo de forja [seg]	Resultado de la soldadura.
IA-IM2000-P01	65 – 70	20 – 25	
IA-IM2000-P02	65 – 70	20 – 25	

IA-IM2000-P03	65 – 70	20 – 25	
IA-IM2000-P04	65 – 70	20 – 25	


Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.



Tabla 9-3: Experimentación final soldadura disímil AISI 304 - AISI 4140

Denominación	Tiempo de calentamiento [seg]	Tiempo de forja [seg]	Resultado de la soldadura.
IA-AC2000-P01	70 – 75	20 – 25	
IA-AC2000-P02	70 – 75	20 – 25	
IA-AC2000-P03	70 – 75	20 – 25	
IA-AC2000-P04	70 – 75	20 – 25	

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

Tabla 10-3: Experimentación final soldadura disímil AISI 4140 - AISI M303

Denominación	Tiempo de calentamiento [seg]	Tiempo de forja [seg]	Resultado de la soldadura.
IA-AC2000-P01	70 – 75	20 – 25	

IA-AC2000-P02	70 – 75	20 – 25	
IA-AC2000-P03	70 – 75	20 – 25	

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

3.9. Inspección visual

Es necesario descartar imperfecciones, discontinuidades, desalineación de los ejes longitudinales de las probetas y fusión incompleta mediante una inspección visual, con el fin de proceder de la manera más adecuada con los ensayos metalográficos. Para que la inspección visual sea aceptada es necesario seguir la norma AWS B1.11M/B1.11:2015 *Guide for the visual examination of Weld*.

3.10. Metodología para el análisis metalográfico

3.10.1. Norma

Para el trabajo en cuestión la norma *ASTM E3-95: Preparation of Metallographic Specimen* es la que rige el análisis metalográfico, la misma recomienda que el corte longitudinal que se realiza en la probeta sea con un constante régimen de enfriamiento, evitando así el calentamiento que puede provocar transformaciones en la estructura.

3.10.2. Equipo

El ensayo metalográfico se realiza con un microscopio óptico Buehler Ltd perteneciente al Laboratorio de Materiales de la Facultad de Mecánica – ESPOCH. La figura 13-3 muestra el equipo.



Figura 13-3: Microscopio óptico Buehler Ltd

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

3.10.3. Micrografía

Para las micrografías se utiliza lentes objetivos de 10X, 20X y 50X con escalas o medidas base de la pantalla de 760, 380 130 micrómetros respectivamente. Según la norma *ASTM E407-99: Standard Practice for Microetching Metals and Alloys*, el ataque químico se realiza con Nital al 5% (5 ml de HNO_3 + 110 ml de Etanol) para los aceros con estructura martensítica y con Vilella (5 ml de HCL +1 g de ácido pricrico + 100 ml de Etanol (95%)) para los inoxidables (ASTM International, 2012).

3.11. Metodología para realizar el ensayo de dureza Rockwell

3.11.1. Norma

La norma *ASTM E18 Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials* es la encargada de guiar el ensayo de dureza; una de las especificaciones que más se debe tomar en cuenta es el paralelismo entre las superficies para garantizar el resultado correcto de la dureza.

3.11.2. Equipo

Se utiliza un durómetro modelo HBRV-187.5 que se encuentra en el Laboratorio de Materiales de la Facultad de Mecánica – ESPOCH, con el cual se es posible medir dureza Vickers, Brinell y Rockwell con solo modificar la carga y colocar el indentador correspondiente. En la figura 14-3 se muestra el equipo.



Figura 14-3: Equipo para medición de dureza Rockwell

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

3.11.3. Probetas para ensayos

En la figura 15-3 se observa cómo quedan las probetas después de ser unidas por soldadura por fricción y cortadas longitudinalmente, adecuadas para ser pulidas y atacadas químicamente para realizar las micrografías y los ensayos de dureza. La longitud de la probeta tiene un mínimo de 30 mm y el ancho depende del diámetro del acero.



Figura 15-3: Probetas soldadas y cortadas listas para ser pulidas

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

3.11.4. Procedimiento para realizar el ensayo de dureza

Con las probetas atacadas por Nital o Vilella dependiendo el tipo acero, se procede con los siguientes pasos:

1. Marcar e identificar un punto en cada zona del cordón como se indica en la figura 16-3.
2. Colocar la probeta en el durómetro asegurando que estén paralelas las superficies con la ayuda de un nivel.
3. Seleccionar la carga a utilizar: 150Kgf (1471N)
4. Se gira el volante hasta ubicar el indentador de cono de diamante en contacto con la superficie de la probeta
5. Para aplicar la precarga de esta máquina se gira el volante hasta visualizar que en la regleta de la pantalla donde se visualiza los valores se llegue al máximo.
6. Se acciona la palanca para que inicie la medición de dureza durante el tiempo ya establecido por defecto en la configuración del instrumento.
7. Al entregar el valor de la dureza directamente se debe esperar a que este completamente estabilizada la regleta de la pantalla y ubicarse en la escala de dureza Rockwell.

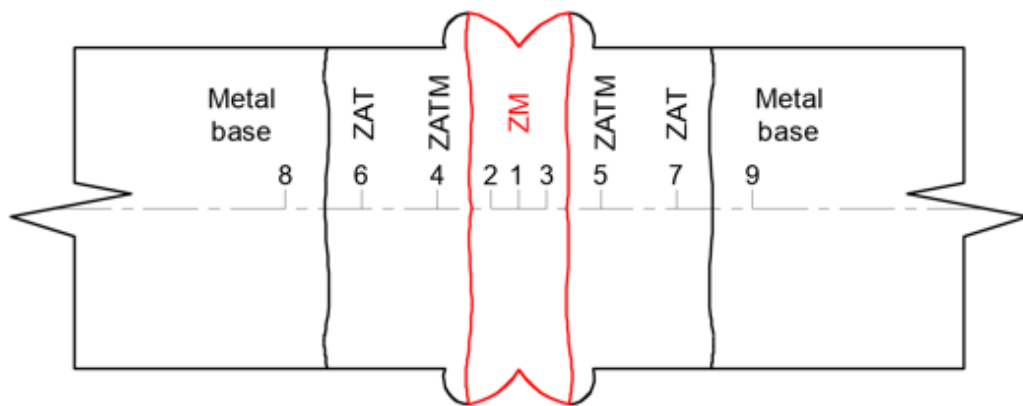


Figura 16-3: Puntos para medición de dureza Rockwell

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

Tabla 11-3: Designación de puntos

Zona del metal	Número
Zonal de Mezclado	1, 2 y 3
Zona afectada térmica y mecánicamente	4 y 5
Zona afectada térmicamente	6 y 7
Metal base	8 y 9

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021



CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS

4.1. Inspección visual



Según los parámetros establecidos por la norma *AWS B1.11M-B1.11-2015 Guide for the Visual Examination of Welds*, que determina si una probeta es apta para seguir con el proceso de análisis metalográfico o no lo son por grietas o fusión incompleta en el cordón que son las más comunes y fáciles de observar. En las tablas desde la 1-4 hasta la 6-4 se encuentran las probetas que no cumplen con la inspección visual.

Tabla 1-4: Probetas de acero inoxidable austenítico AISI 304 descartadas por inspección visual

Denominación	Características	Resultado de la soldadura.
IA2000-P04	Fusión incompleta. Separación profunda en la junta.	
IA2000-P07	Fusión incompleta. Separación profunda en la junta. Descentrado de las piezas.	


Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.


Tabla 2-4: Probetas de acero inoxidable martensítico AISI M303 descartadas por inspección visual

Denominación	Características	Resultado de la soldadura.
IM2000-P03	Pandeo durante la etapa de forja comprometiendo la calidad de la junta.	
IM2000-P05	Fusión incompleta. Separación profunda en la junta.	

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.



Tabla 3-4: Probetas de acero al cromo AISI 4140 descartadas por inspección visual

Denominación	Características	Resultado de la soldadura.
AC2000-P03	La calidad de la junta no corresponde a una junta correctamente soldada.	

AC2000-P06	Separación profunda en la junta. Fusión solo en la parte central.	
------------	--	--



Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

Tabla 4-4: Probetas de acero inoxidable austenítico AISI 304 y martensítico AISI M303 descartadas por inspección visual

Denominación	Características	Resultado de la soldadura.
IA-IM2000-P02	La calidad de la junta no corresponde a una junta correctamente soldada.	
IA-IM2000-P04	Separación profunda en la junta. Fusión incompleta.	


Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

Tabla 5-4: Probetas de acero inoxidable austenítico AISI 304 y acero al cromo AISI 4140 descartadas por inspección visual

Denominación	Características	Resultado de la soldadura.
IA-IM2000-P02	La calidad de la junta no corresponde a una junta correctamente soldada.	
IA-IM2000-P04	Fusión solo en la parte central. Descentrado de ejes. Separación profunda	

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

Tabla 6-4: Probeta de acero al cromo AISI 4140 y acero inoxidable martensítico AISI M303 y descartadas por inspección visual

Denominación	Características	Resultado de la soldadura.
IA-IM2000-P02	Pandeo en el proceso. El mal control al aplicar la presión generó una onda amorfa comprometiendo la calidad de la junta.	

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

4.2. Determinación de los constituyentes en la junta soldada

Para la soldadura entre los mismos materiales la microestructura no va a variar mucho, pero para el caso de la soldadura con materiales disímiles se debe predecir la microestructura que se va a obtener en la junta por lo tanto se va a predecir con la ayuda del diagrama de Schaeffler, al no tener material de aporte se considera con 50% de dilución.

Al calcular el cromo y níquel equivalente con las ecuaciones del diagrama según la composición de los aceros que se muestra en la tabla 7-4, las intersecciones se marcan mediante puntos en el diagrama como en el gráfico 1-4.

Tabla 7-4: Composición de los aceros y cálculo del cromo y níquel equivalente

	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Ni	% Mo	Cromo equival.	Níquel equival.
AISI 304	0,08	1	2	0,045	0,015	19	9,25	0	20,5	12,65
AISI M303	0,27	0,3	0,65	0	0	14,5	0,85	1	15,95	9,275
AISI 4140	0,405	0,25	0,875	0,03	0,04	0,95	0	0,2	1,525	12,5875

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

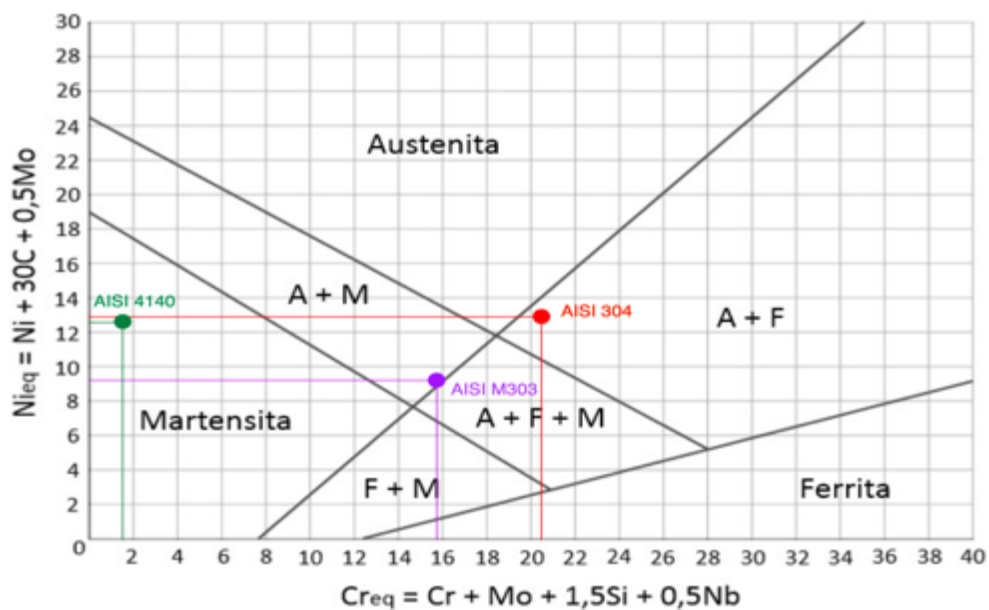


Gráfico 1-4: Diagrama de Schaeffler ubicado el acero AISI 304, AISI M 303 y AISI 4140

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

Para la soldadura entre dos aceros inoxidable austenítico AISI 304 y martensítico AISI M303 con 50% de dilución, el gráfico 2-4 muestra el diagrama Schaeffler donde se indica que la microestructura de la zona de contacto presenta austenita, ferrita y martensita

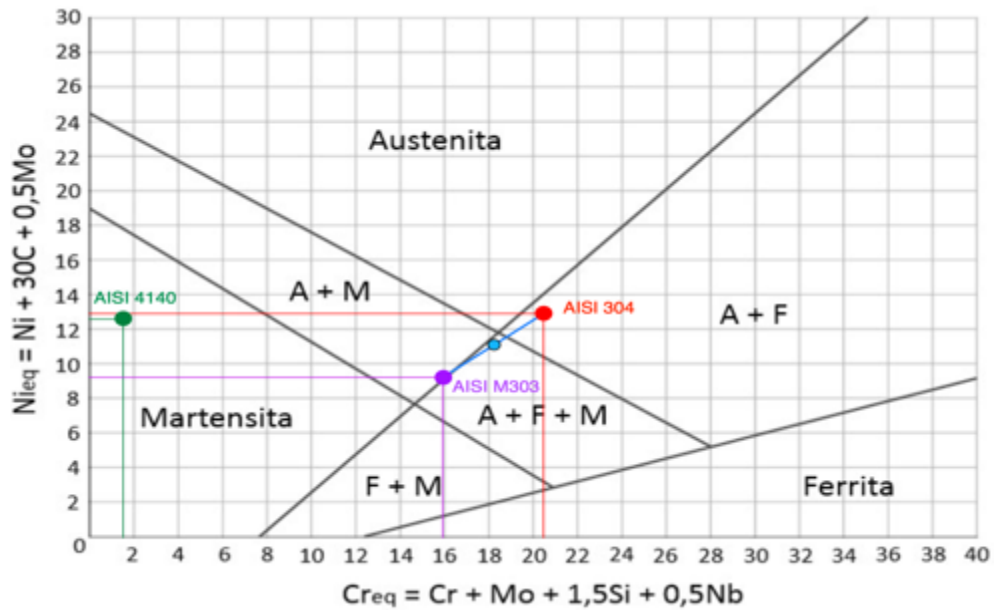


Gráfico 2-4: Determinación de la microestructura de la junta soldada entre un AISI 304 y AISI M303

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

Para la soldadura entre un acero inoxidable austenítico AISI 304 y acero al cromo AISI 4140 con 50% de difusión, el gráfico 3-4 muestra el diagrama Schaeffler donde se indica que la microestructura de la zona de contacto presenta austenita y martensita.

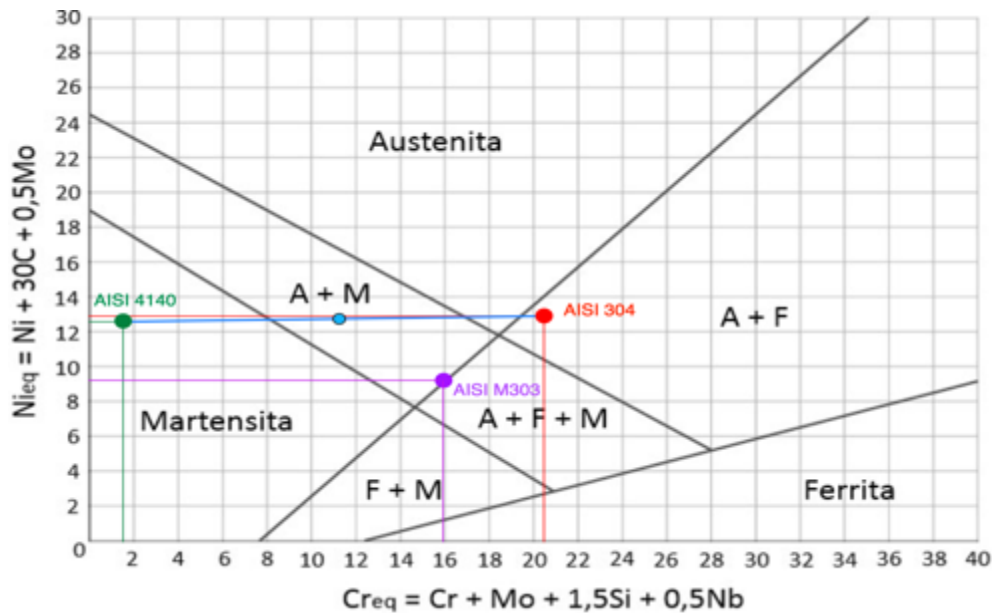


Gráfico 3-4: Determinación de la microestructura de la junta soldada entre un AISI 304 y AISI 4140

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

Finalmente, para la soldadura entre un acero al cromo AISI 4140 y un acero inoxidable AISI 304 con 50% de difusión, el gráfico 4-4 muestra el diagrama Schaeffler donde se indica que la microestructura de la zona de contacto contendrá únicamente martensita.

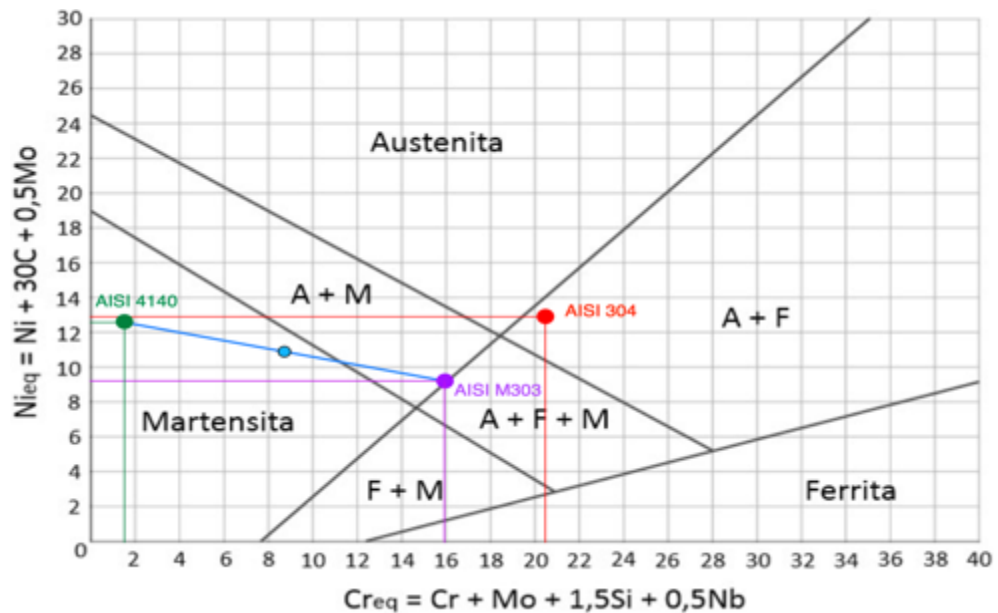


Gráfico 4-4: Predicción de la microestructura de la junta soldada entre un AISI M303 y AISI 4140

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

4.3. Análisis metalográfico

A simple vista es posible diferenciar el material base del afectado por el calor debido al sutil cambio de color al poseer diferentes microestructuras y estos cambios a su vez delimita las zonas. El material base (MB) es la zona más alejada de la junta en este las propiedades se mantiene al no ser alterado en el proceso. Junto a esta se encuentra la zona afectada térmicamente (ZAT) esta solo ha sido alcanzada por el calor, después sigue la zona afectada térmica y mecánicamente (ZATM) que presenta deformación plástica de los materiales. Rodeada por la anterior se encuentra la zona de contacto o mezclado (ZC) donde los materiales deformados plásticamente se fusionan. Estas zonas es posible visualizar en la figura 1-4.

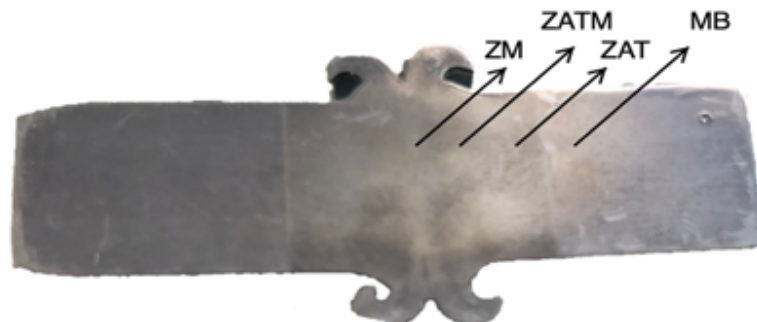


Figura 1-4: Zonas afectadas por el calor en una probeta soldada por soldadura por fricción rotacional.

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

4.3.1. Soldadura de acero inoxidable austenítico AISI 304

La microestructura de esta soldadura contiene austenita y ferrita por su composición, estas van a cambiar en porcentaje dependiendo de la afectación térmica de la zona.

4.3.1.1. Metal base y zona afectada térmicamente

Para el MB la austenita y ferrita son las microestructuras existentes, siendo la primera la que predomina como se puede ver en la figura 2-4 que muestra las micrografías de la zona con un lente de 100x 200x y 500x. La parte blanca de la figura es austenita pura mientras que la oscura que bordea los granos es una mezcla de austenita y ferrita. En la figura 3-4 se observa como el calor comienza a influir dejando ver como los granos de la parte izquierda son ligeramente más pequeños que los de costado derecho. En la figura 4-4 ZAT se tiene una uniformidad en el tamaño de los granos y la ampliación 500x muestra como la parte oscura que es ferrita ha disminuido con la cual la dureza de esta zona también debe bajar.

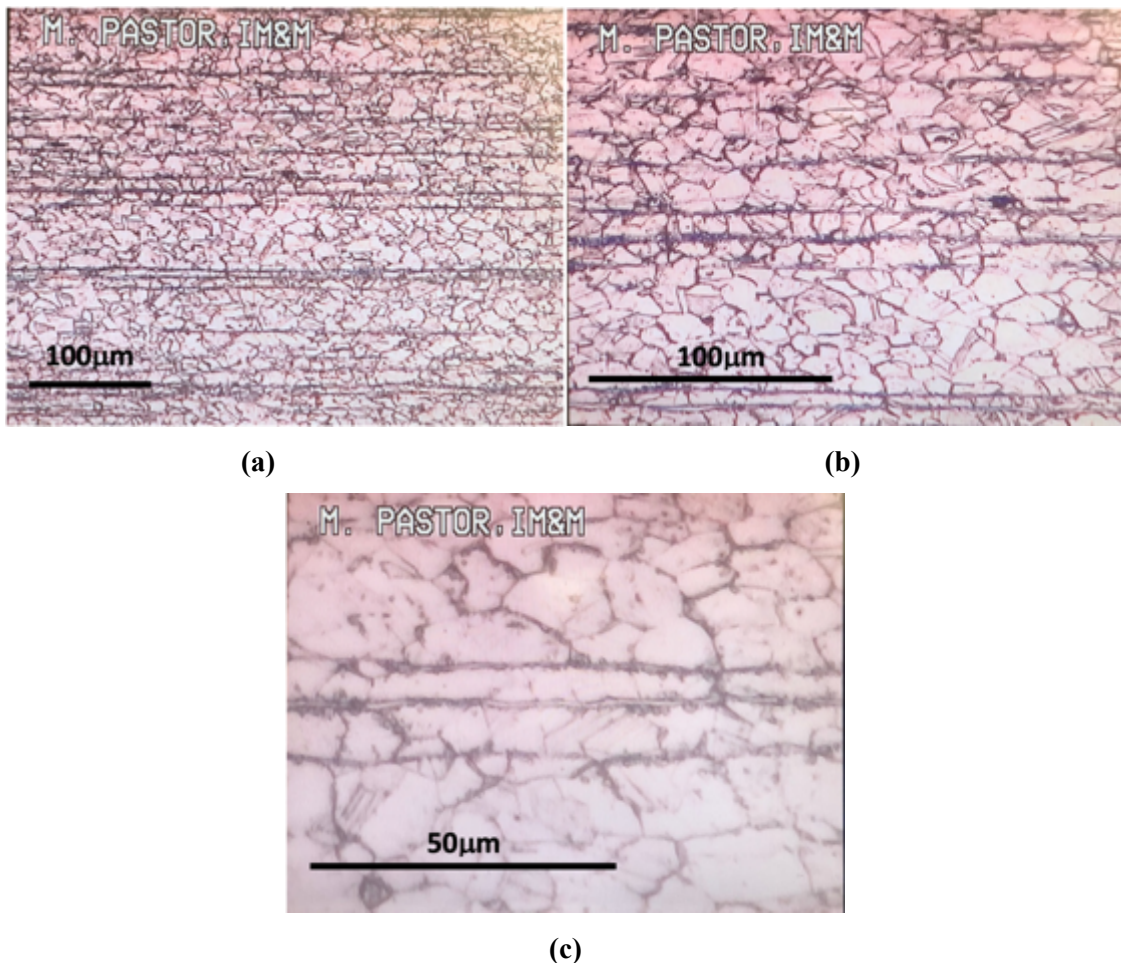
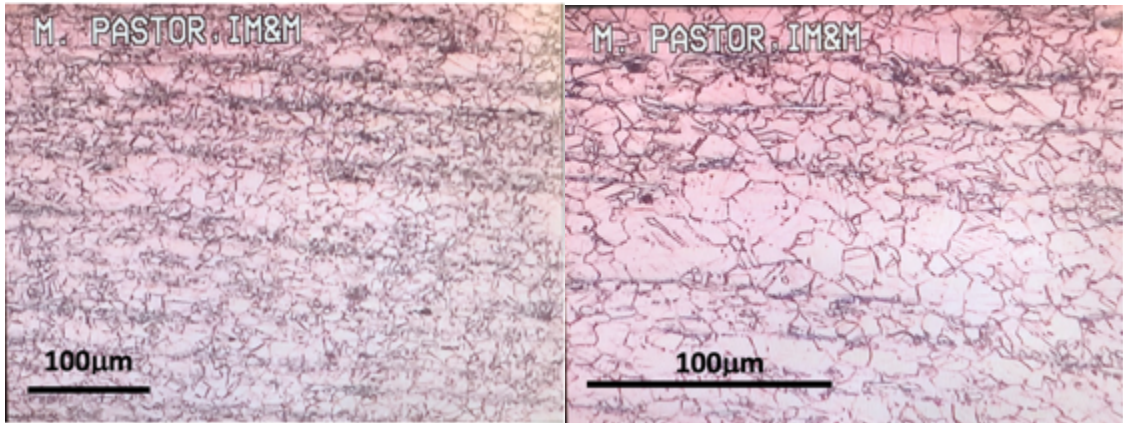


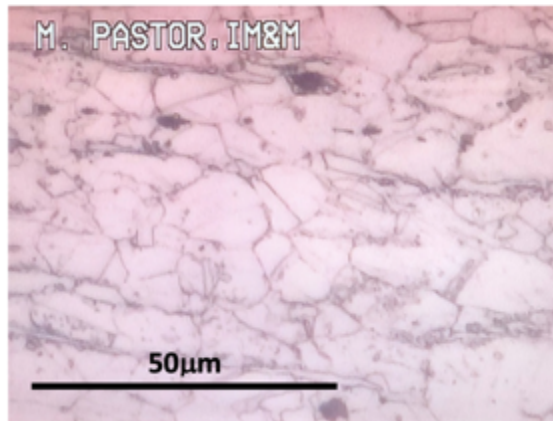
Figura 2-4: Micrografía del metal base a) 100x, b)200x y c) 500x de una probeta AISI 304

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.



(a)

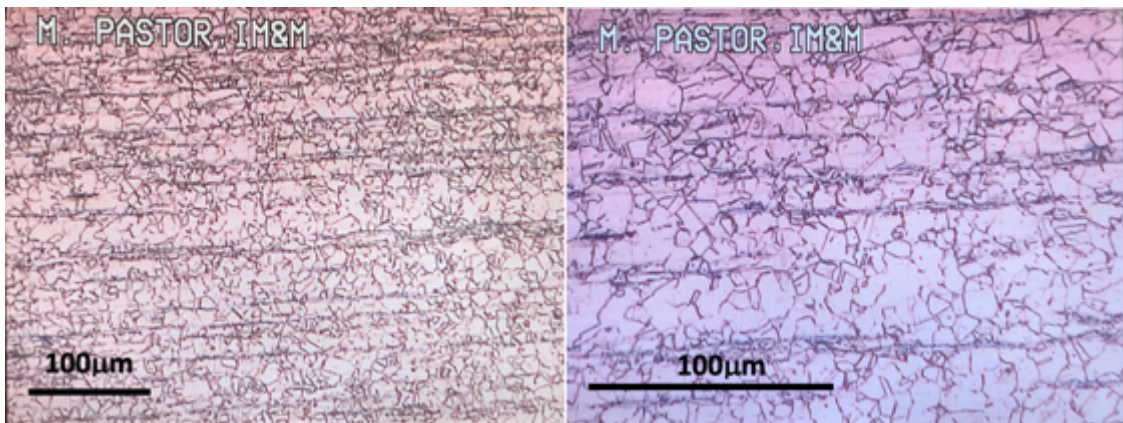
(b)



(c)

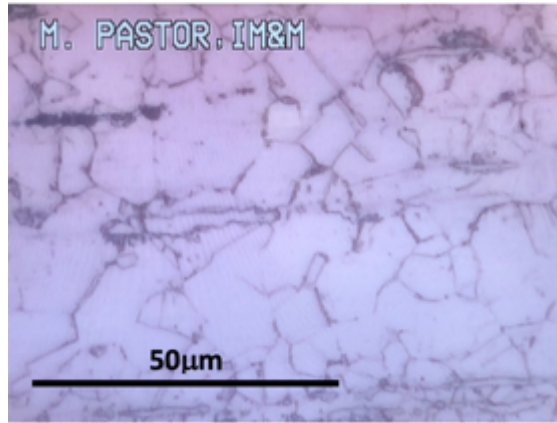
Figura 3-4: Micrografía de la transición entre metal base y la ZAT a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta AISI 304

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.



(a)

(b)



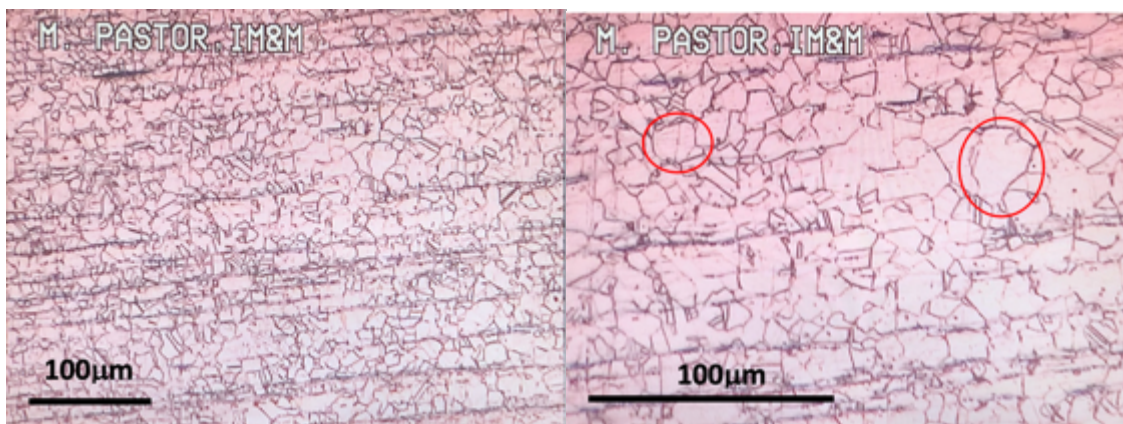
(c)

Figura 4-4: Micrografía de la ZAT a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta AISI 304

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

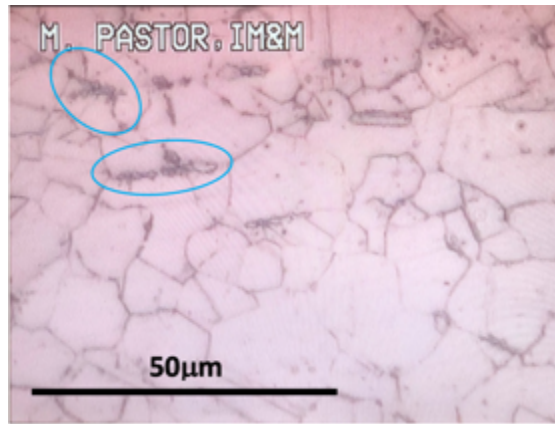
4.3.1.2. Zona afectada térmica y mecánicamente

En la figura 5-4 que es una zona de transición se puede notar que las líneas horizontales que existían comienzan a tener una pequeña inclinación, esto se debe a la rotación y al rozamiento de proceso, además que los granos de austenita continúan creciendo. En la figura 5-4 (b) se puede visualizar la diferencia de tamaño de un grano de austenita de la ZAT y uno de la ZATM, de igual manera en la figura 5-4 (c) encerrado en un círculo y en los bordes de los granos de austenita se encuentra la ferrita que es menor a la del MB debido a que el calor la transformó en austenita. La ZATM se puede ver en la figura 6-4 donde los granos de austenita efectivamente tienen una inclinación y siendo una de las zonas que es afectada por la temperatura máxima aquí se encuentran los granos con el mayor tamaño.



(a)

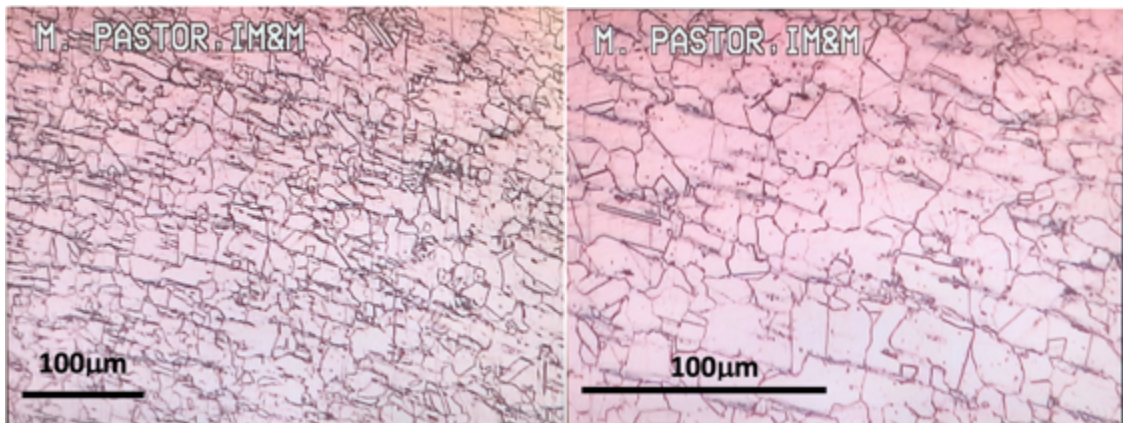
(b)



(c)

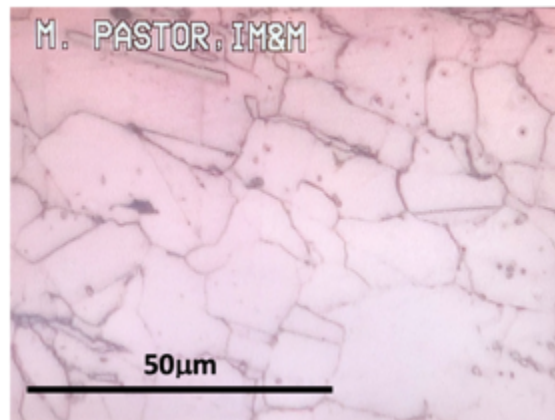
Figura 5-4: Micrografía de la zona de transición entre la ZAT y la ZATM a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta AISI 304

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.



(a)

(b)



(c)

Figura 6-4: Micrografía de la ZATM a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta AISI 304

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

4.3.1.3. Zona de mezclado

La figura 7-4 muestra la transición de ZATM a la ZM, por la presión que se aplica se ve como los granos son más pequeños y comienza de nuevo a existir zonas negras de ferrita. La figura 8-4 muestra una zona de granos medianos además de ferrita en sus límites a causa de esto las propiedades mecánicas de esta zona serán mejores en comparación con las zonas afectadas por el calor.

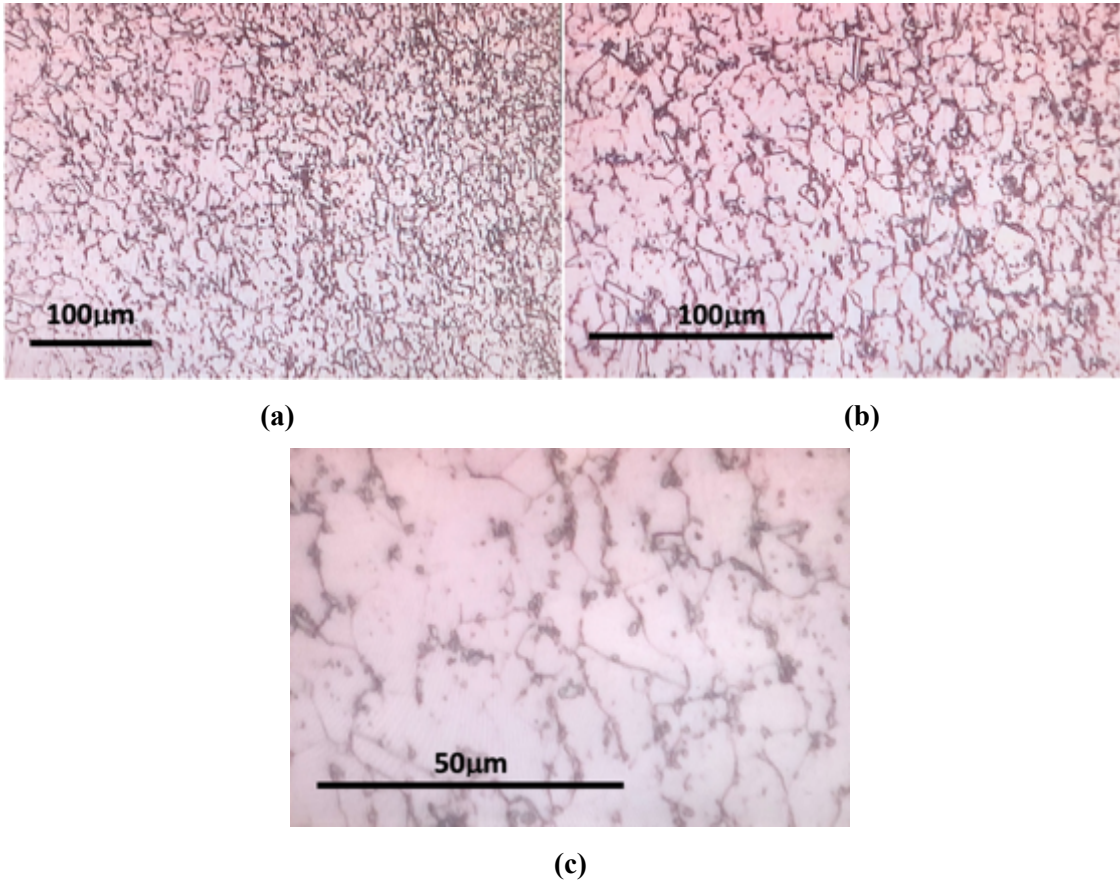
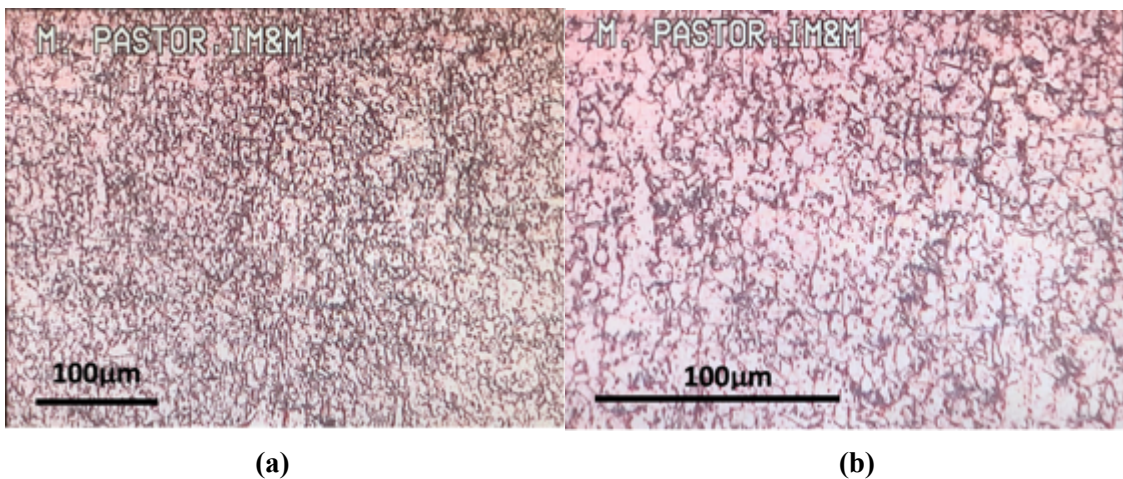
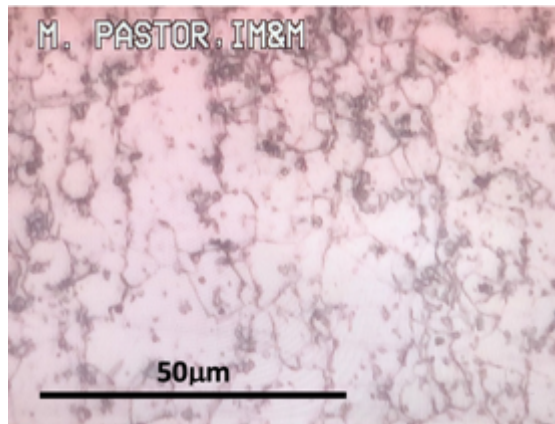


Figura 7-4: Micrografía de la zona de transición entre la ZATM y la ZM a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta AISI 304

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.





(c)

Figura 8-4: Micrografía de ZM a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta AISI 304

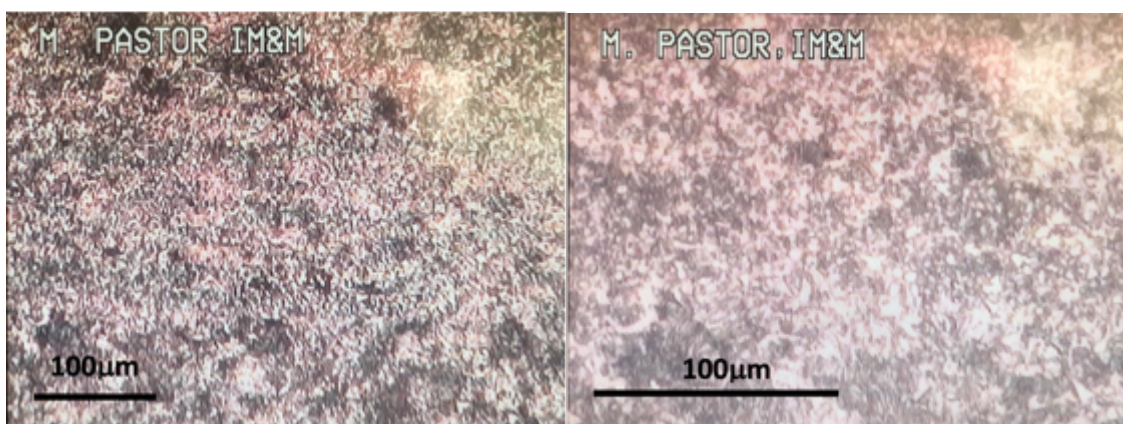
Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

4.3.2. Soldadura de acero inoxidable martensítico AISI M303

La microestructura de esta soldadura va a ser completamente de martensita en tablillas ya que tiene su contenido de carbono es menor al 0,6 %.

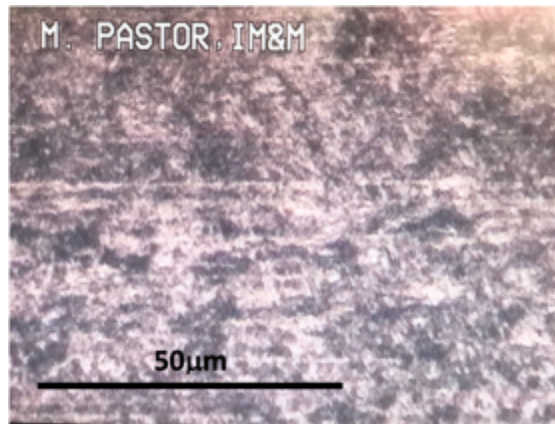
4.3.2.1. Material base y zona afectada térmicamente

Esta zona al no ser afectada por el calor del proceso mantiene en su totalidad la martensita en tablillas como se puede observar en la figura 9-4 además de partículas de carburos y pequeñas cantidades de austenita retenida. En la figura 10-4 se observa como el calor influye que manera que a la izquierda visualmente es más clara. La figura 11-4 que contiene las micrografías de la ZAT muestra que no existe una diferencia muy notable en con el MB, un cambio visible en esta zona es la presencia de unas líneas horizontales que según se acerque a la ZM se irán curvando.



(a)

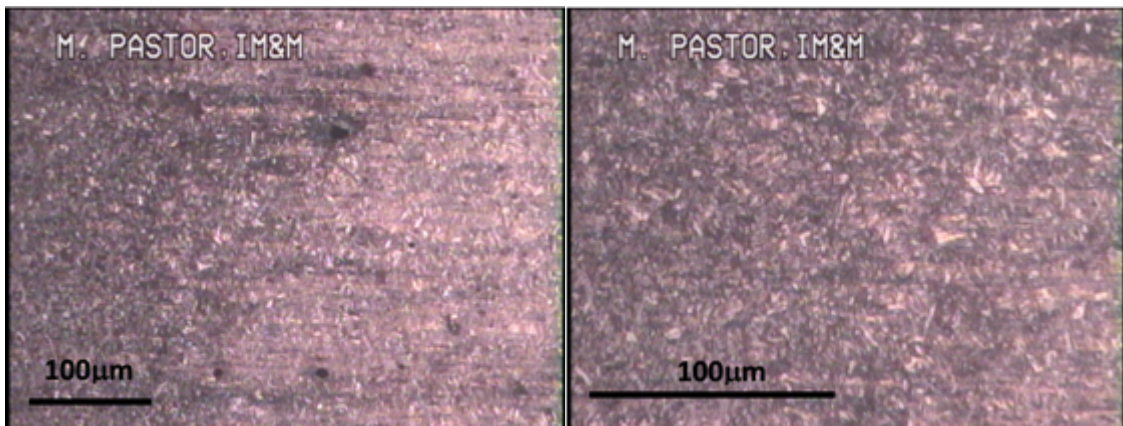
(b)



(c)

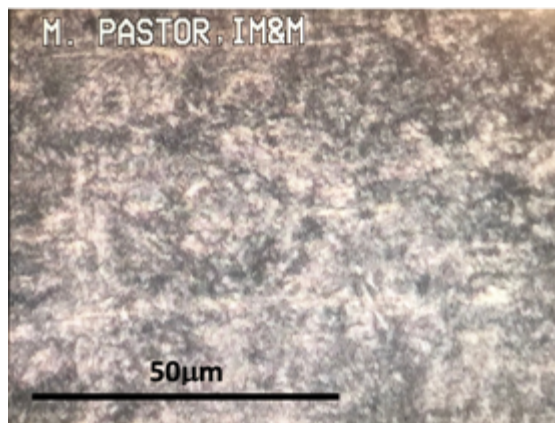
Figura 9-4: Micrografía del MB a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta AISI M303

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.



(a)

(b)



(c)

Figura 10-4: Micrografía de la transición entre el MB y la ZAT a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta AISI M303

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

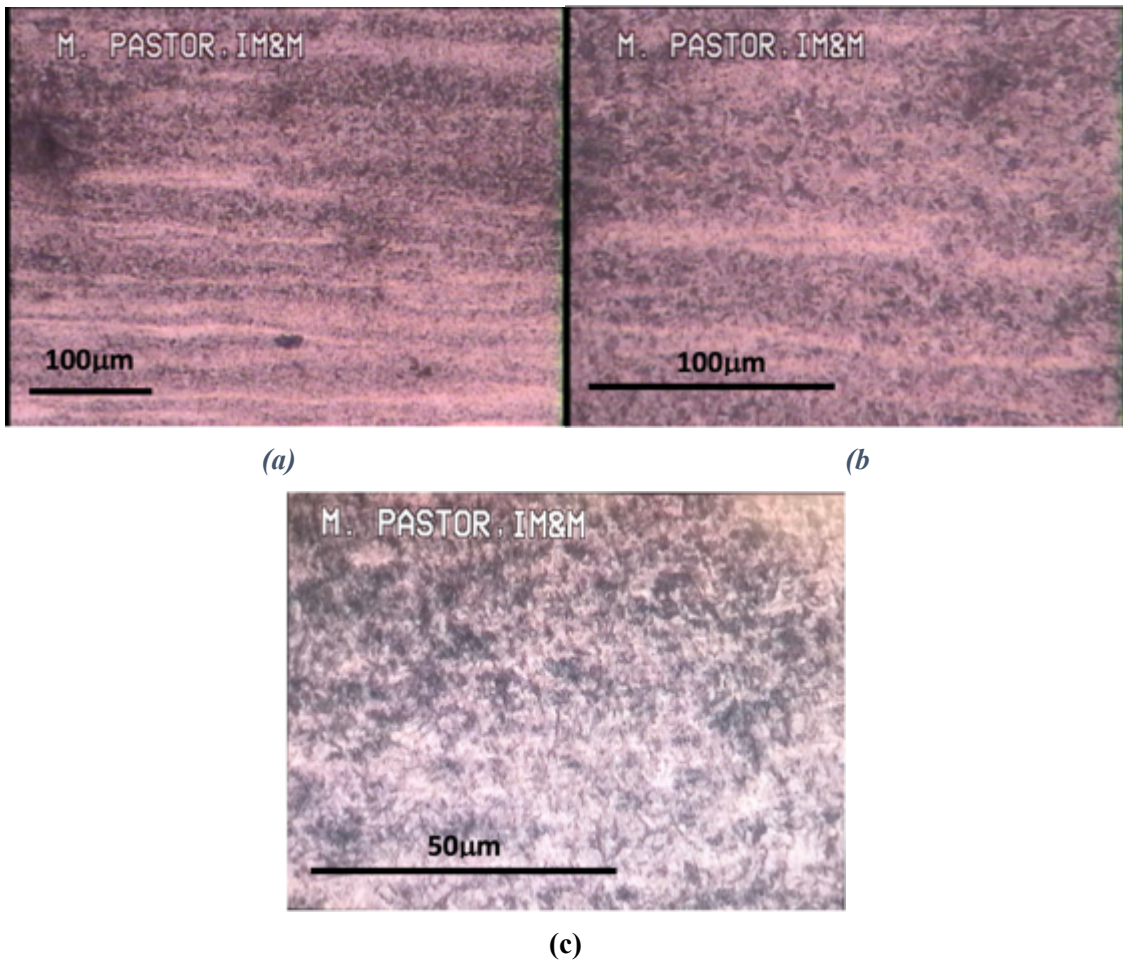
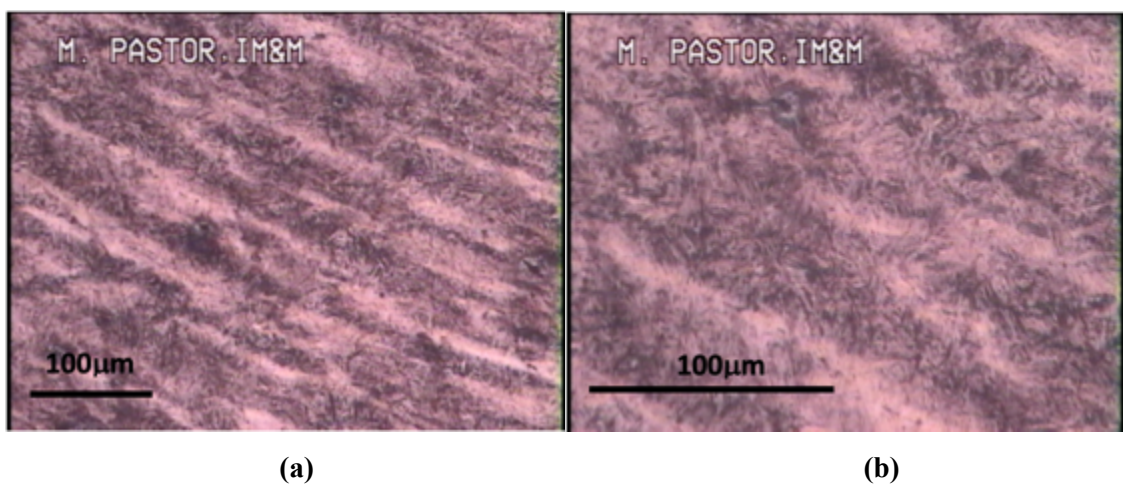
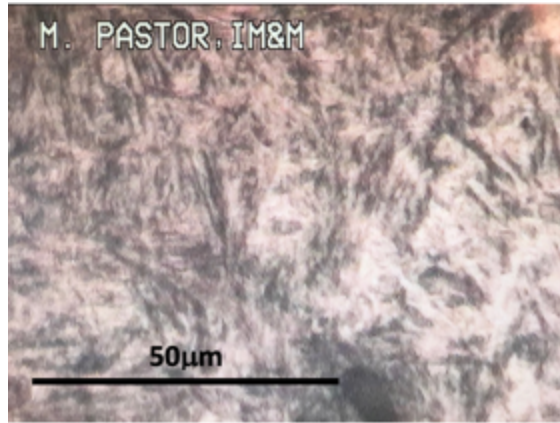


Figura 11-4: Micrografía de la ZAT a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta AISI M303
 Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

4.3.2.2. Zona afectada térmica y mecánicamente

La figura 12-4 que es una zona de transición uno de los cambios con mayor evidencia son las curvas que existen, desde esta zona empieza a ser más visibles los carburos. La ZATM se muestra en la figura 13-4 la que muestra una microestructura casi al 100% de martensita debido a que la austenita retenida se ha ido transformando en martensita.

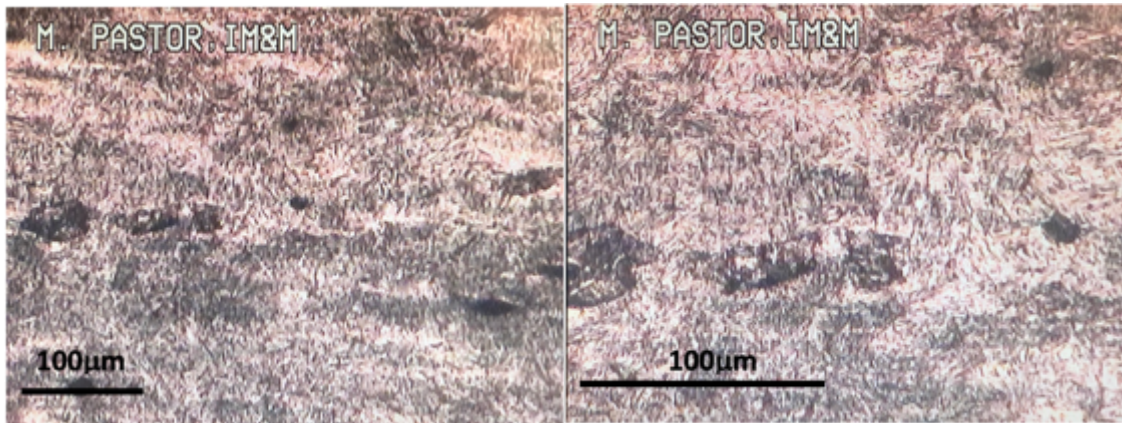




(c)

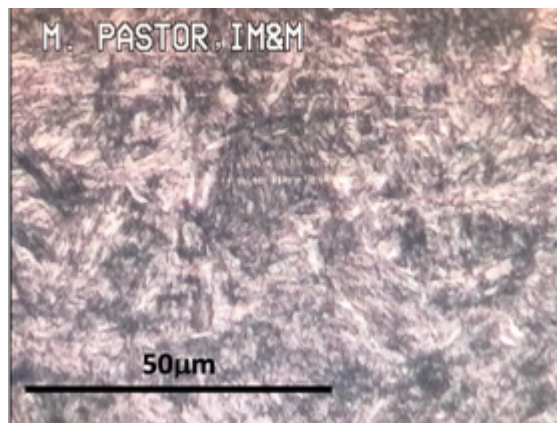
Figura 12-4: Micrografía de la transición entre la ZAT y ZATM a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta AISI M303

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.



(a)

(b)



(c)

Figura 13-4: Micrografía de la ZATM a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta AISI M303

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

4.3.2.3. Zona de mezclado

En la figura 14-4 se observa la zona de transición y se puede ver que la distribución de la microestructura se encuentra de forma diagonal y en la figura 15-4 referente a la ZM se observa martensita gruesa en una base de austenita revenida.

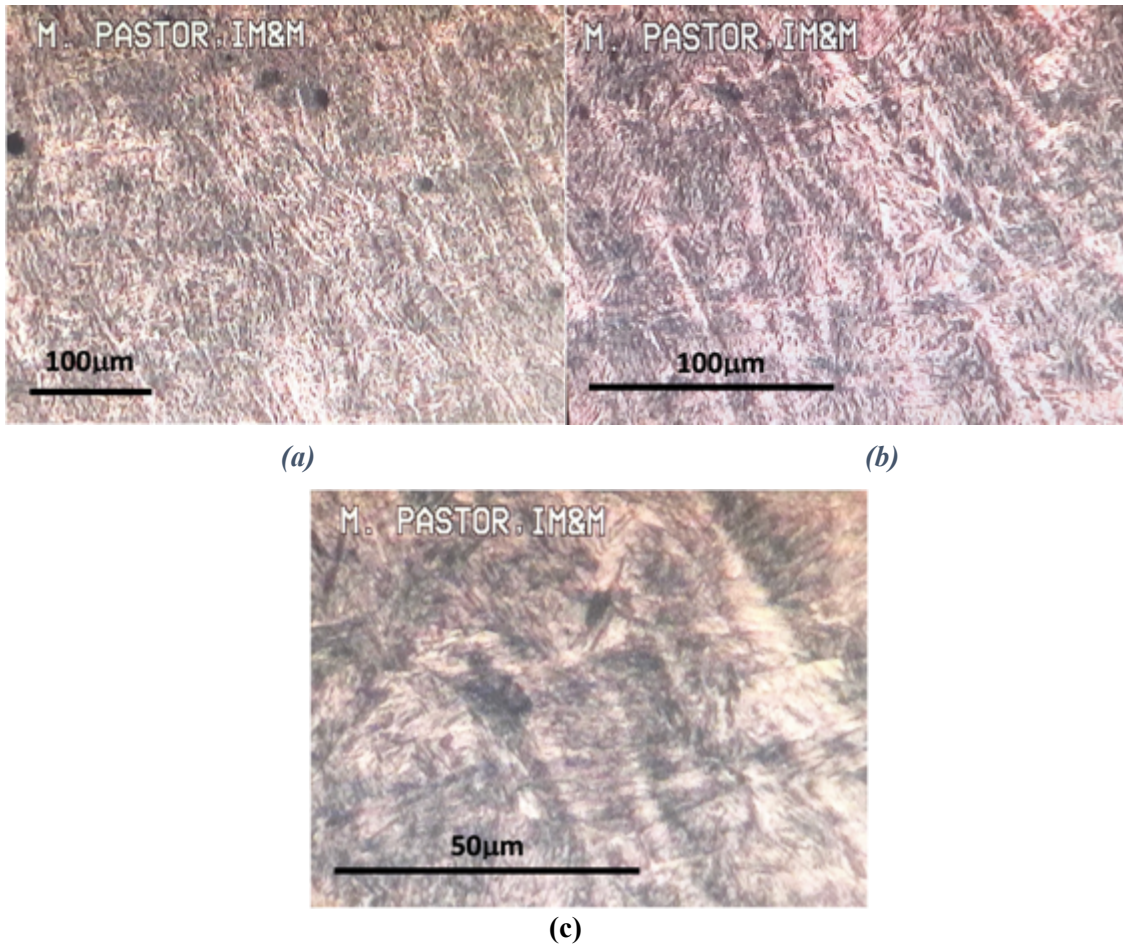
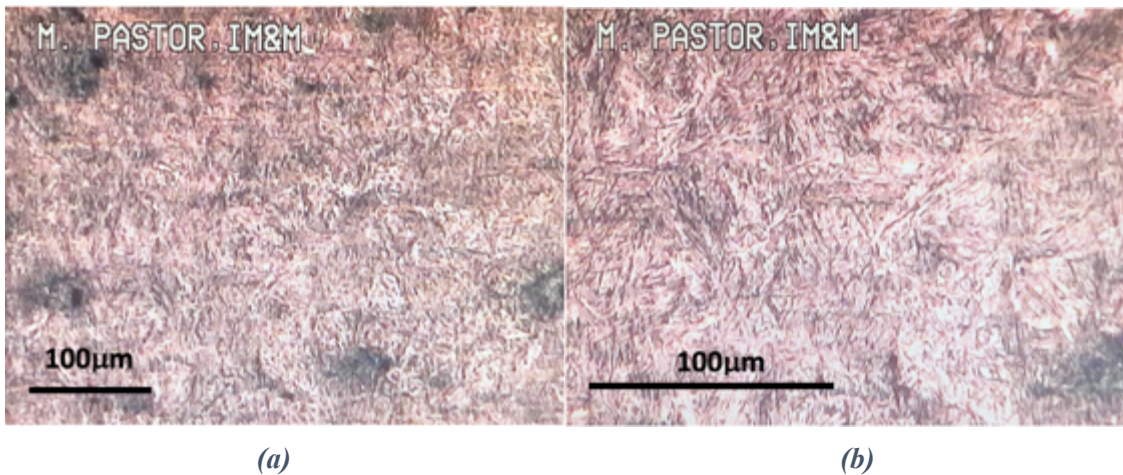
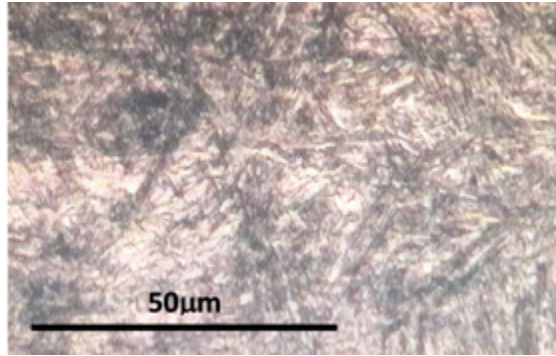


Figura 14-4: Micrografía de la transición entre la ZATM y la ZM a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta AISI M303

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.





(c)

Figura 15-4: Micrografía de la ZM a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta AISI M303

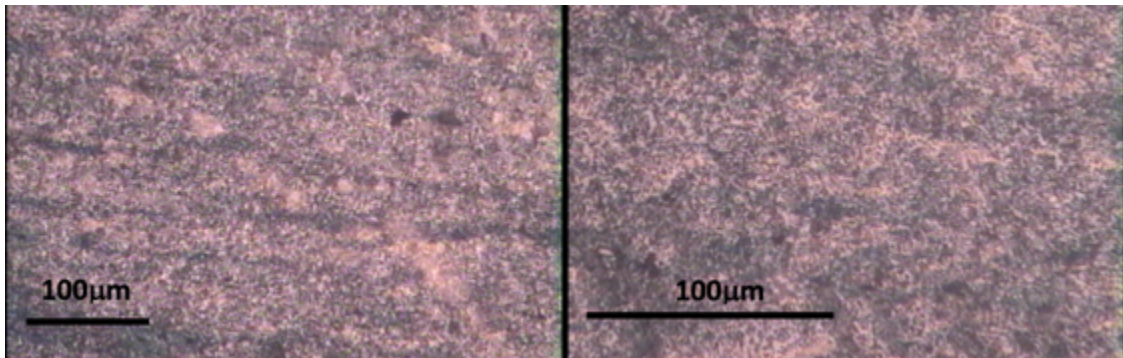
Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

4.3.3. Soldadura de acero al cromo AISI 4140

La microestructura de esta soldadura va a ser completamente de martensita.

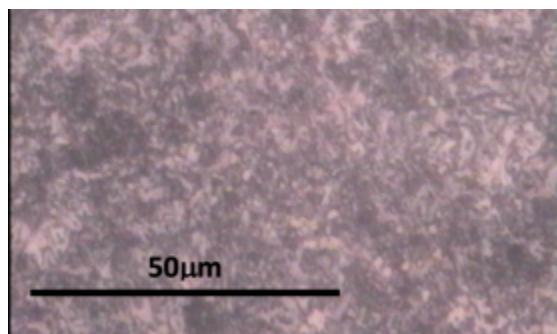
4.3.3.1. Material base y zona afectada térmicamente

En la figura 16-4 que muestra la microestructura se observa martensita con austenita retenida, la figura 17-4 muestra la transición entre esta zona y la ZAT que es más oscura debido que el calor a transformando parte de la austenita, en la figura 18-4 que se encuentra la ZAT se observa uniformidad en la microestructura en referencia a la transformación de austenita.



(a)

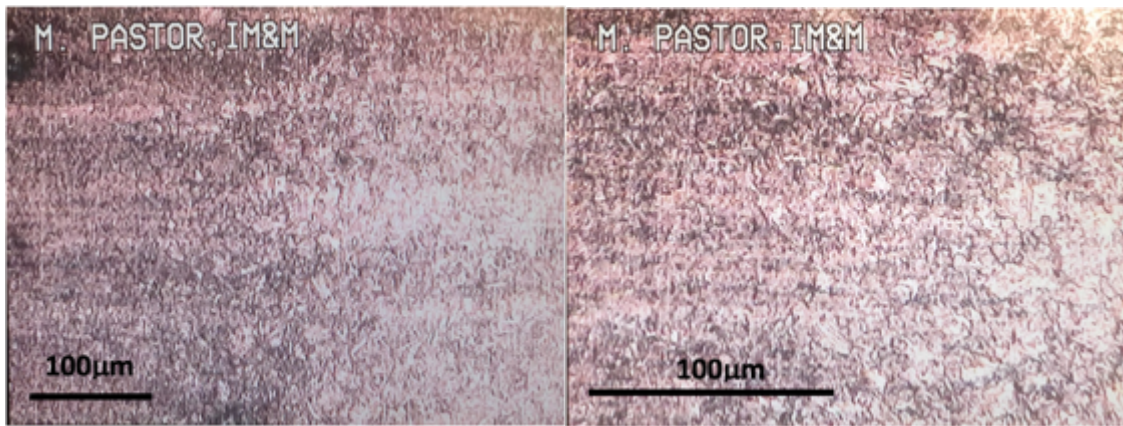
(b)



(c)

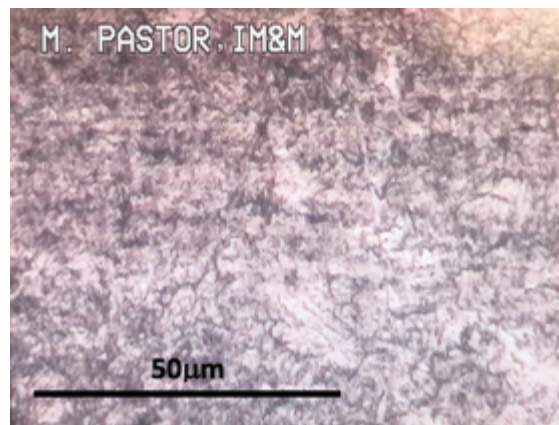
Figura 16-4: Micrografía del MB a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta AISI 4140

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.



(a)

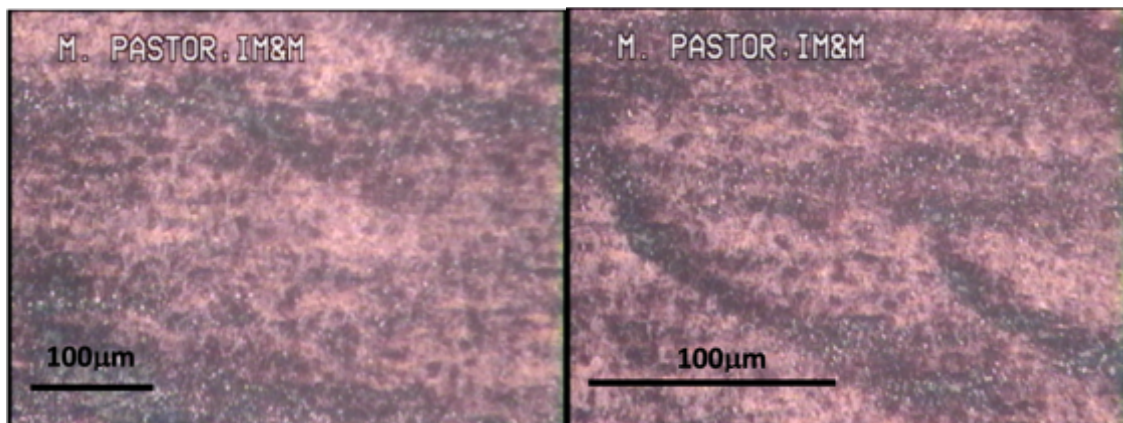
(b)



(c)

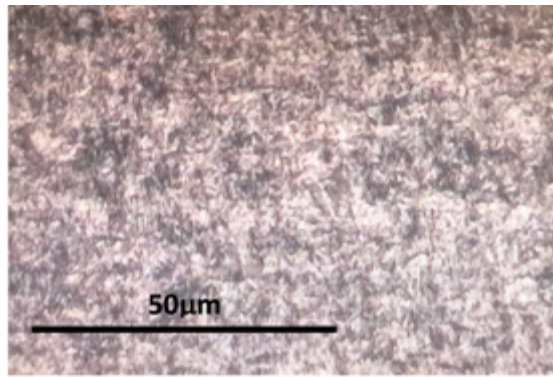
Figura 17-4: Micrografía de la transición entre el MB y ZAT a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta AISI 4140

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.



(a)

(b)



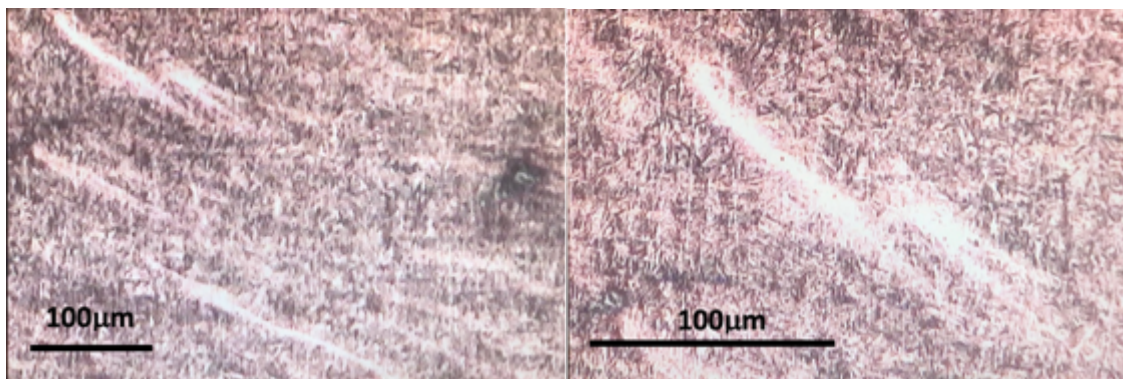
(c)

Figura 18-4: Micrografía de la ZAT a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta AISI 4140

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

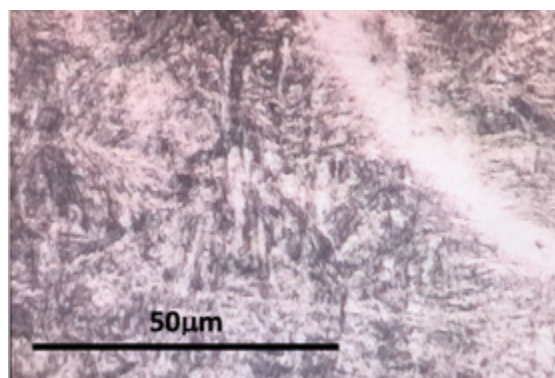
4.3.3.2. Zona afectada térmica y mecánicamente

La figura 19-4 muestra curvas en la microestructura muy comunes por que se ha venido observando en esta zona durante este proceso de soldadura. La ZATM que se muestra en la figura 20-4 posee martensita gruesa que se encuentra distribuida de manera vertical, además de ser la más gruesa en comparación con las otras zonas.



(a)

(b)



(c)

Figura 19-4: Micrografía de la transición entre la ZAT y la ZATM a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta AISI 4140

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

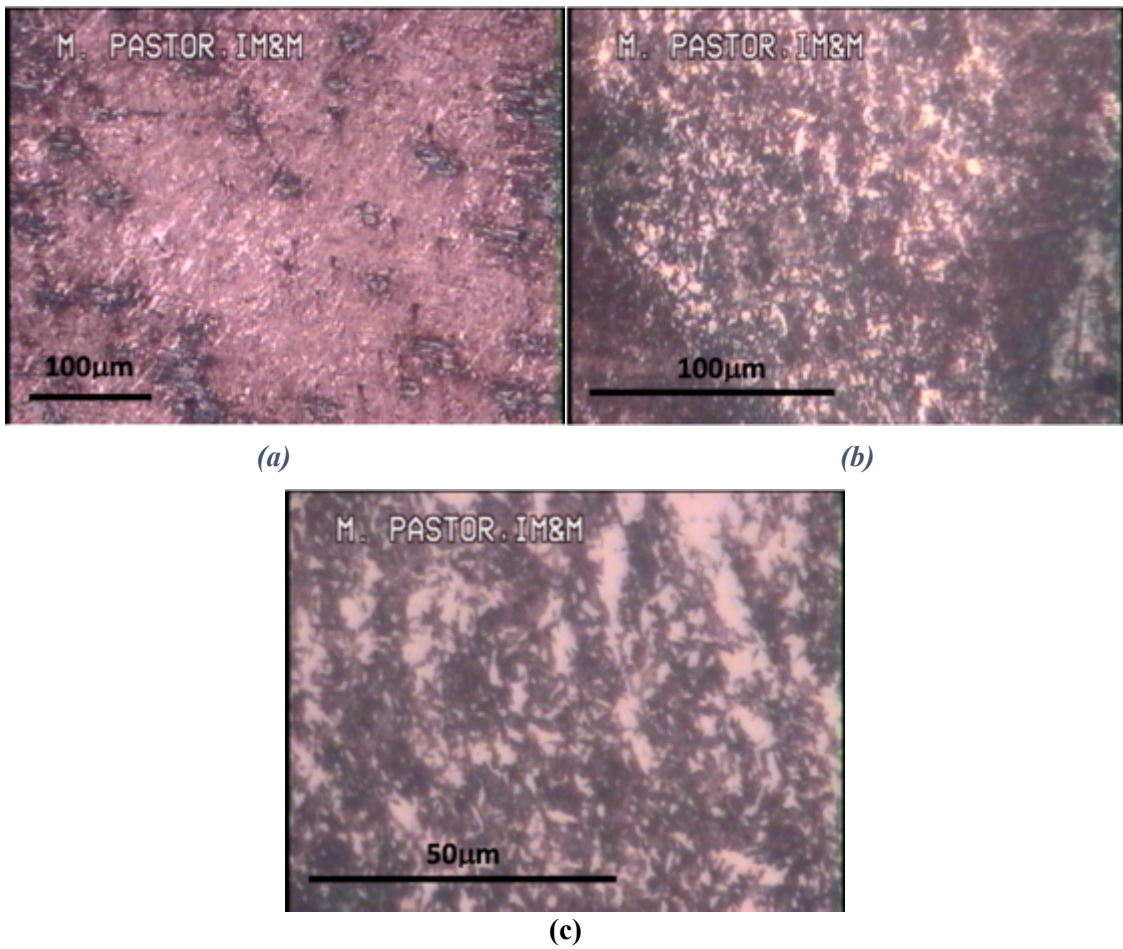
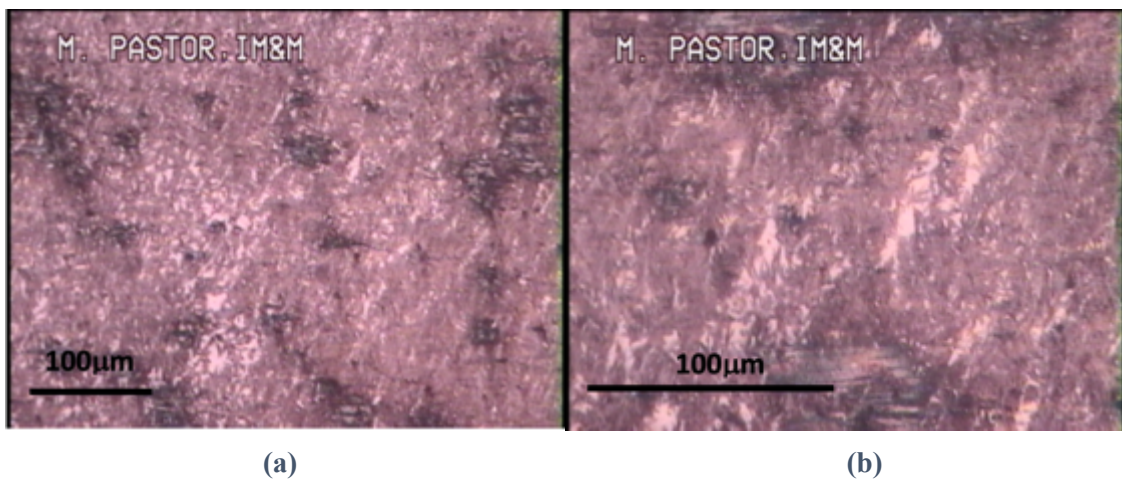
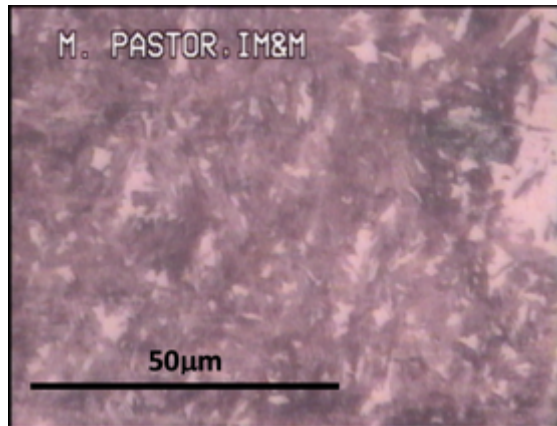


Figura 20-4: Micrografía de la ZATM a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta AISI 4140
 Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

4.3.3.3. Zona de mezclado

Se mantiene la distribución vertical y como se visualiza en la figura 21-4 la martensita gruesa va disminuyendo conforme se acerca a la zona de mezclado. La figura 22-4 muestra la ZM con una martensita gruesa con una base austenítica de menor tamaño a la ZATM.

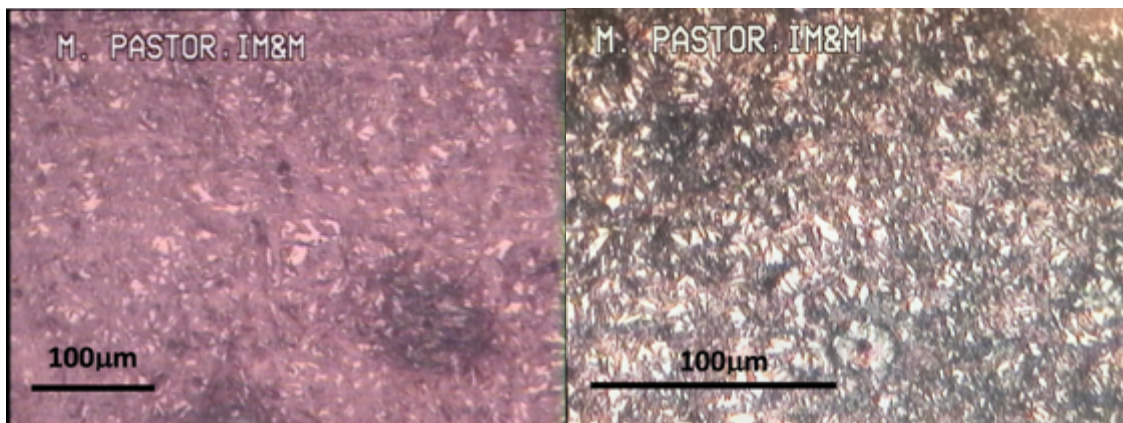




(c)

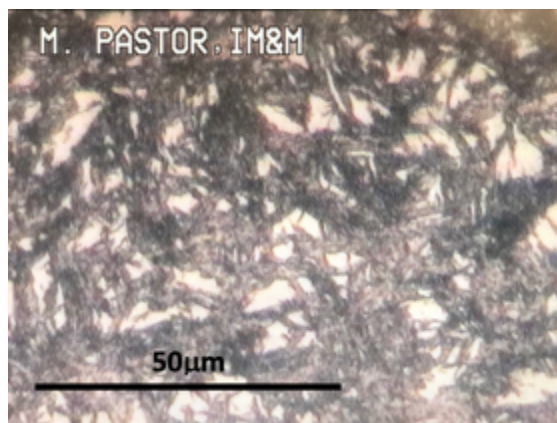
Figura 21-4: Micrografía de la transición entre la ZATM y ZM a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta AISI 4140

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.



(a)

(b)



(c)

Figura 22-4: Micrografía de la ZM a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta AISI 4140

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

4.3.4. Soldadura disímil AISI 304 - AISI M303

Para esta soldadura las MB y ZAT mantienen el comportamiento mostrado para las soldaduras anteriores, las figuras desde la 23-4 hasta la 26-4 muestran la ZATM y su transición a la ZM que mantienen el proceder, para el M303 la martensita gruesa con poca presencia de austenita retenida en el caso del 304 existe una elevada presencia de ferrita en los límites de grano de la austenita y en ambos casos una disposición inclinada de los granos y la martensita. La figura 27-4 muestra la ZM con una ampliación de 500x en diferentes sectores en los cuales se observa martensita gruesa, austenita y ferrita que coincide con lo que se predijo.

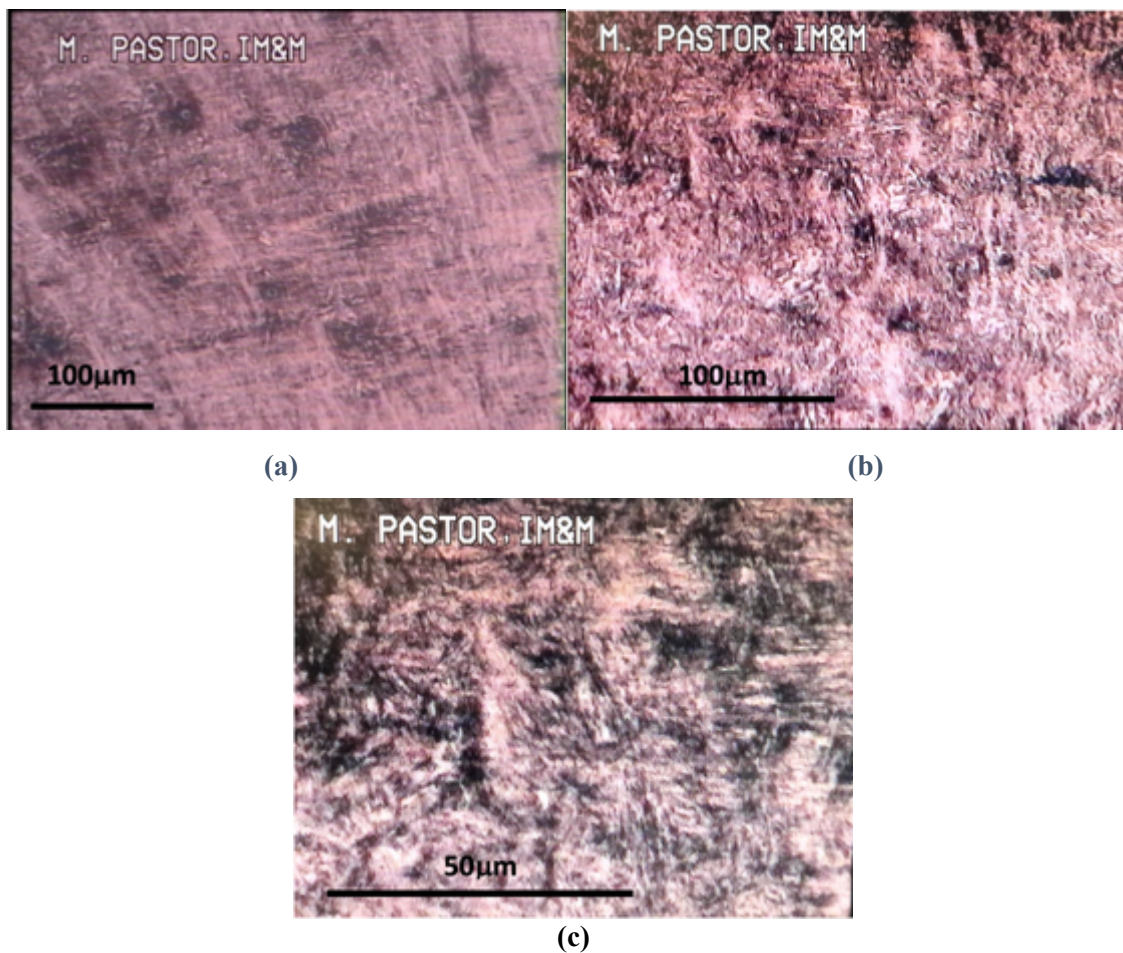
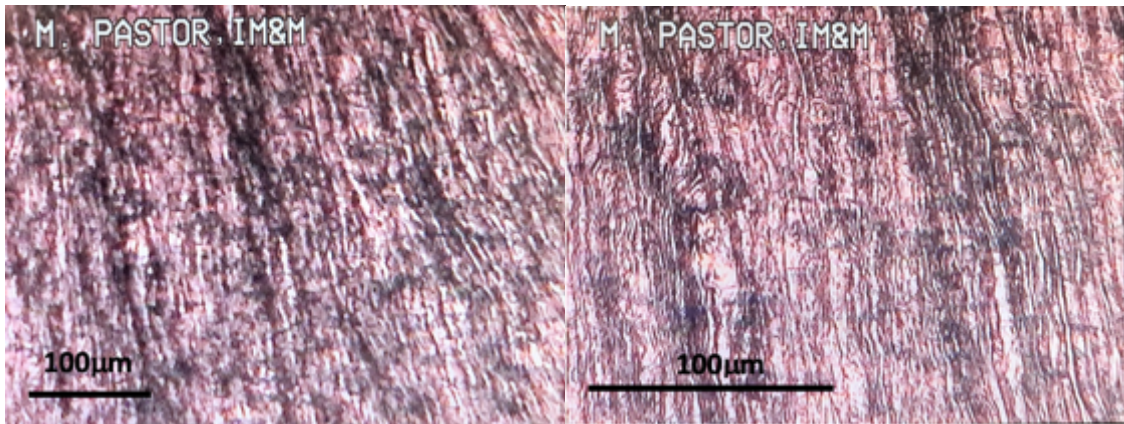


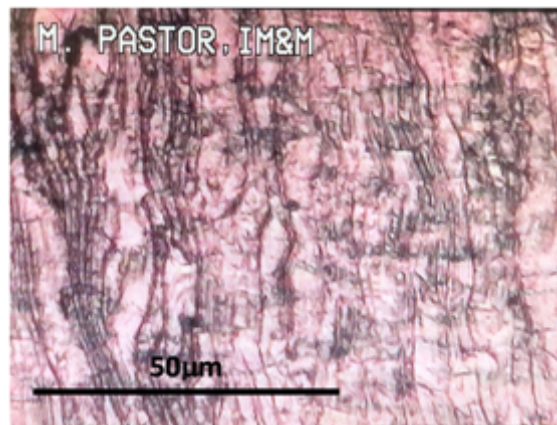
Figura 23-4: Micrografía de la ZATM (M303) a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta soldada entre AISI 304 y AISI M303

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.



(a)

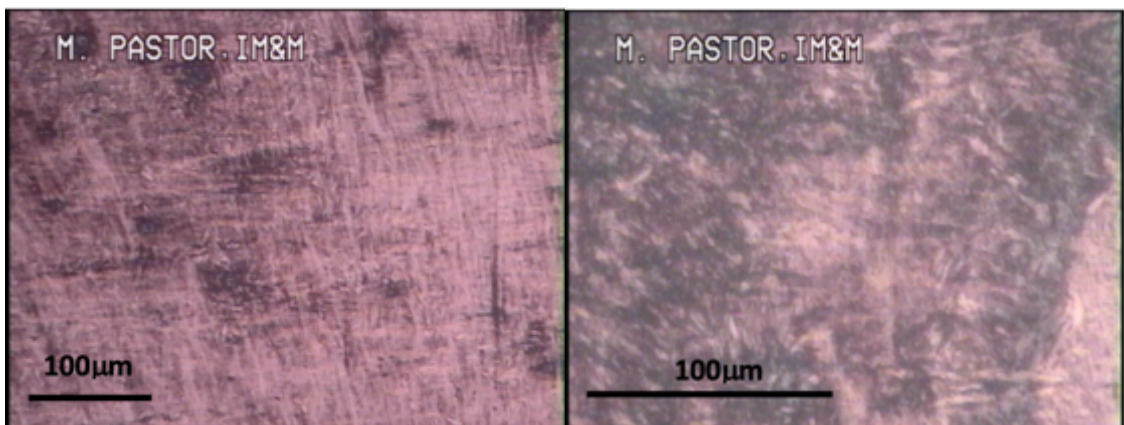
(b)



(c)

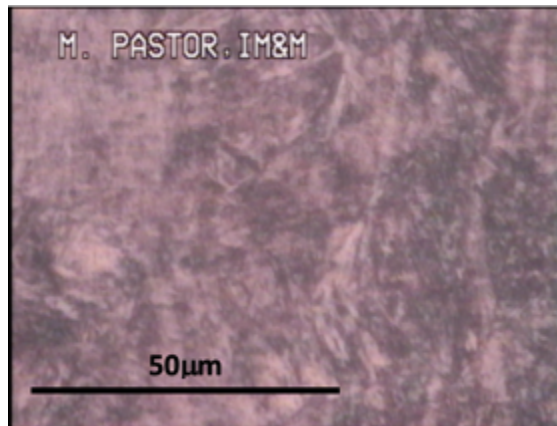
Figura 24-4: Micrografía de la ZATM (304) a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta soldada entre AISI 304 y AISI M303

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.



(a)

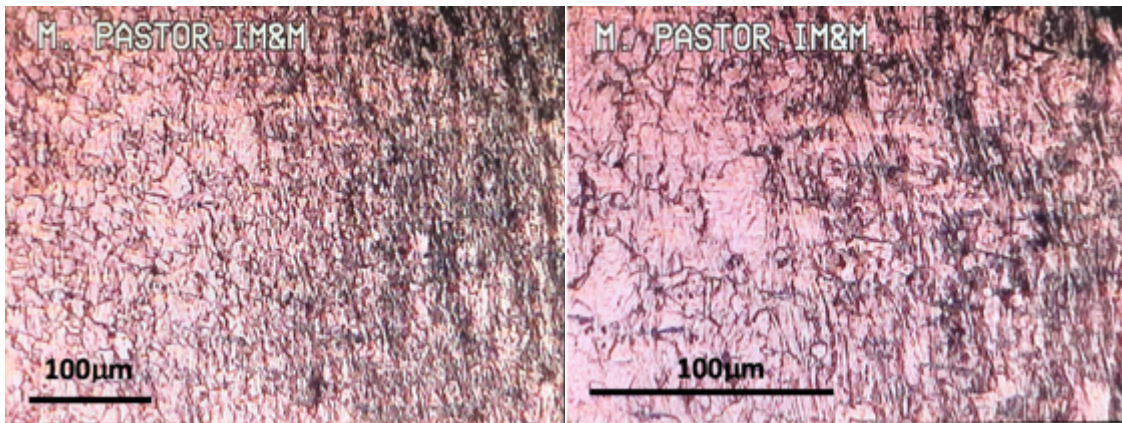
(b)



(c)

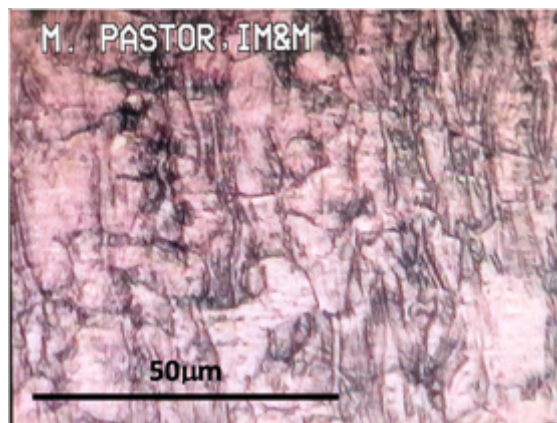
Figura 25-4: Micrografía de la transición entre la ZATM y la ZM (M303) a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta soldada entre AISI 304 y AISI M303

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.



(a)

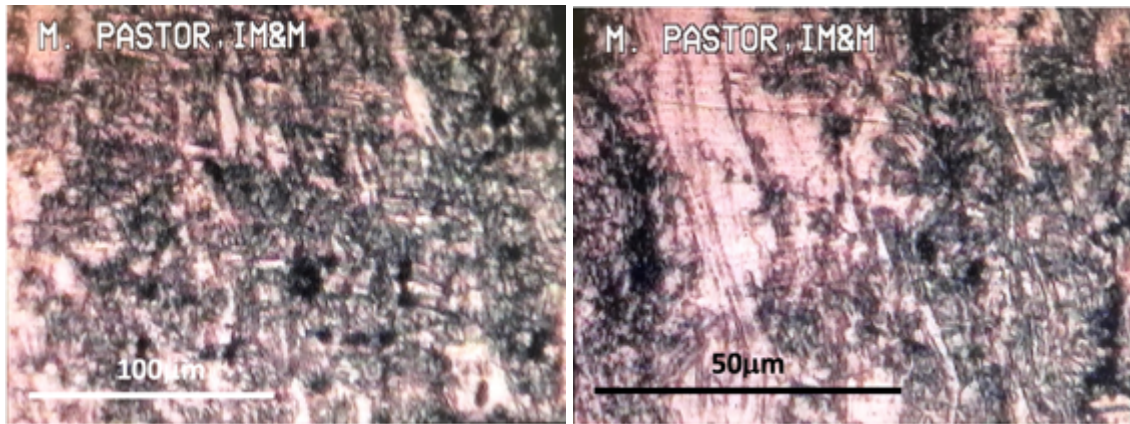
(b)



(c)

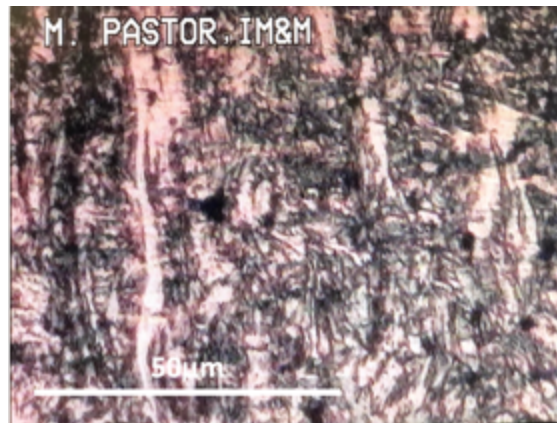
Figura 26-4: Micrografía de la transición entre la ZATM y la ZM (304) a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta soldada entre AISI 304 y AISI M303

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.



(a)

(b)



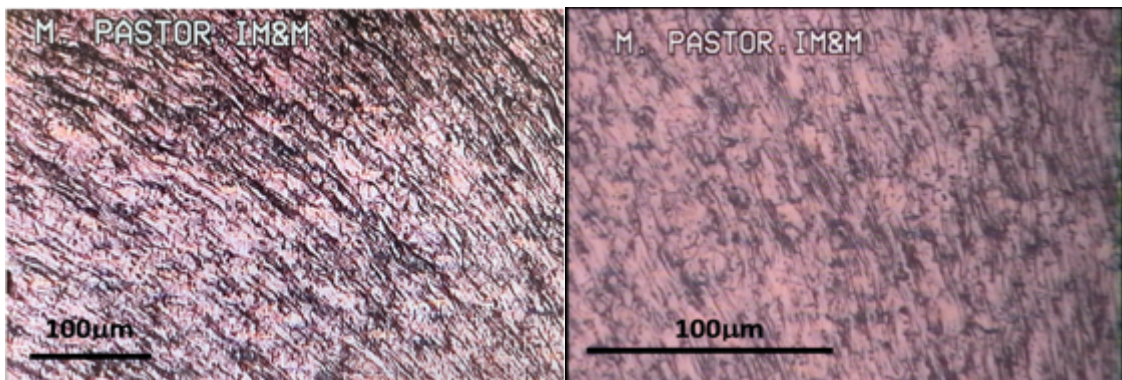
(c)

Figura 27-4: Micrografía de la ZM a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta soldada entre AISI 304 y AISI M303

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

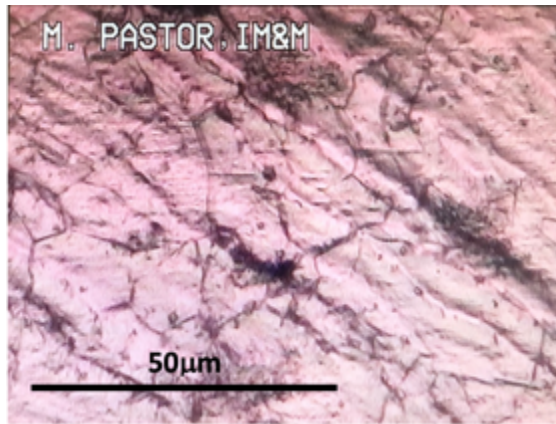
4.3.5. Soldadura disímil AISI 304 - AISI 4140

Las figuras desde la 28-4 hasta la 31-4 exponen el compartimiento de los aceros AISI 304 y 4140 en la ZATM y transición al la ZM, este no cambia mantenido la presencia de austenita y ferrita para el inoxidable y martensita gruesa para el acero al cromo. En la figura 32-4 la zona de mezclado presenta martensita gruesa de menor tamaño a la de la ZATM



(a)

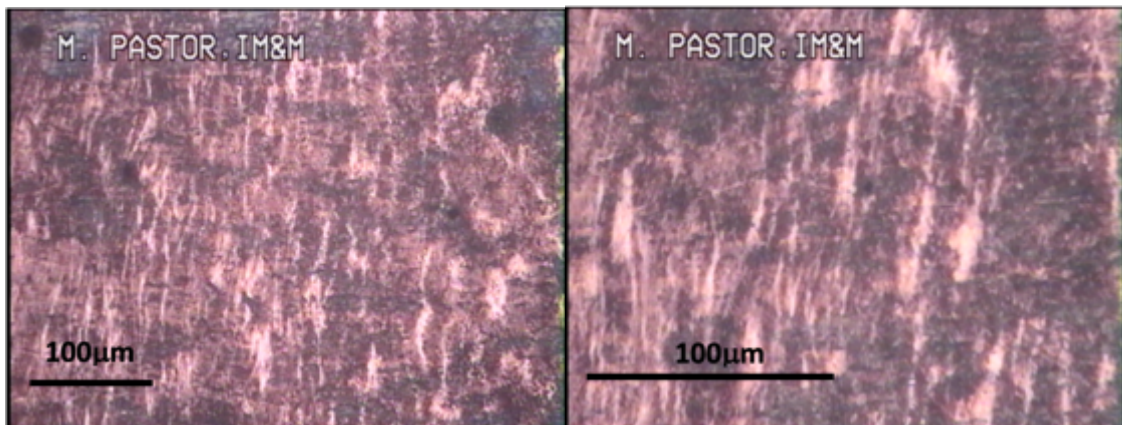
(b)



(c)

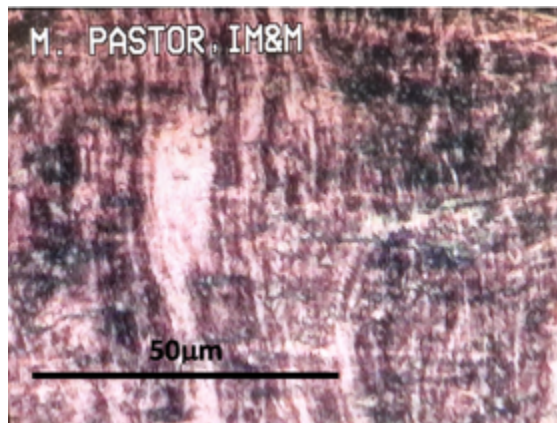
Figura 28-4: Micrografía de la ZATM (304) a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta soldada entre AISI 304 y AISI 4140

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.



(a)

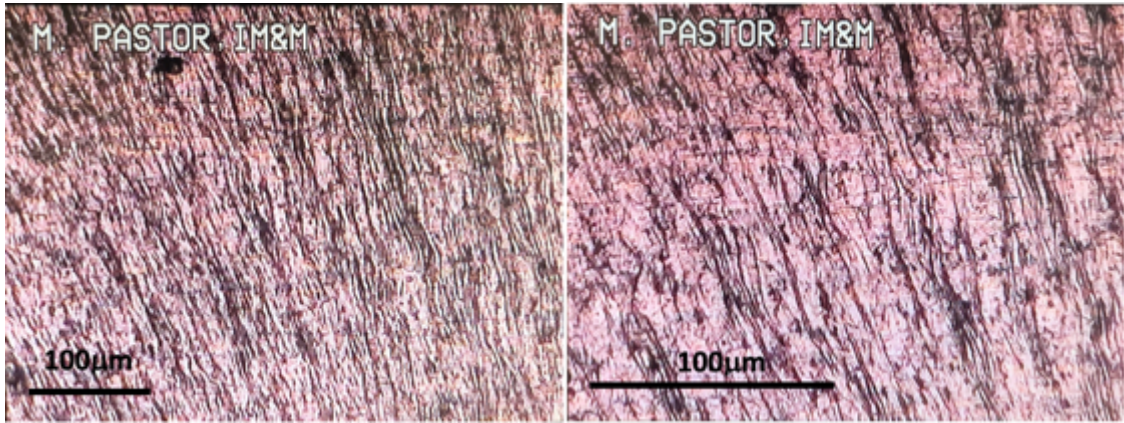
(b)



(c)

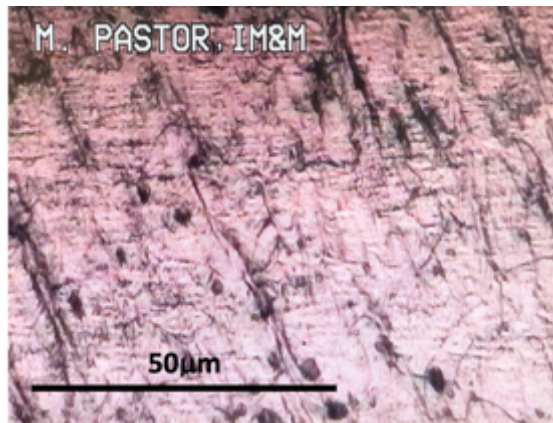
Figura 29-4: Micrografía de la ZATM (4140) a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta soldada entre AISI 304 y AISI 4140

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.



(a)

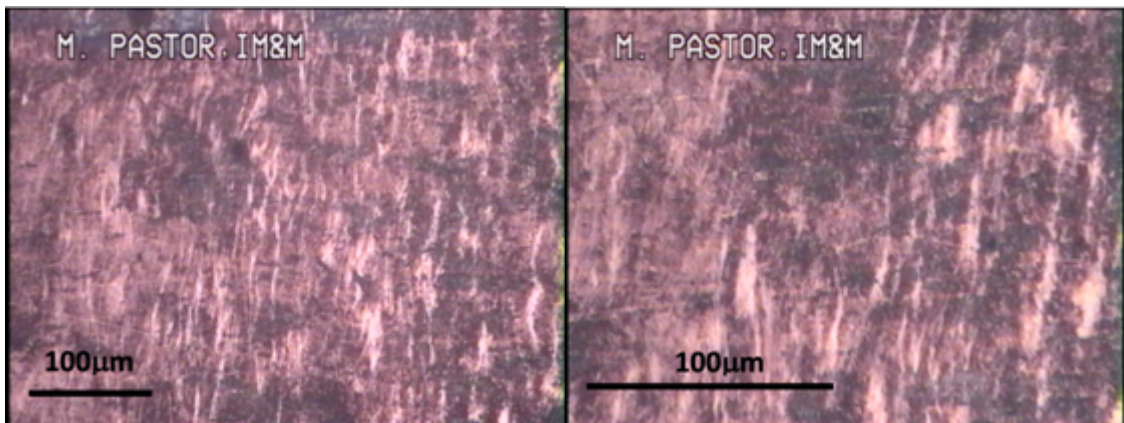
(b)



(c)

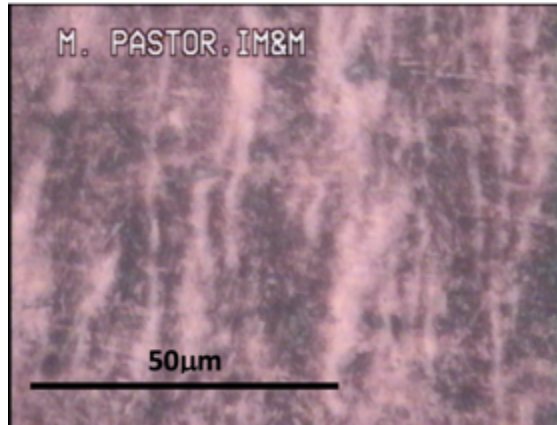
Figura 30-4: Micrografía de la transición entre la ZATM y la ZM (304) a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta soldada entre AISI 304 y AISI 4140

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.



(a)

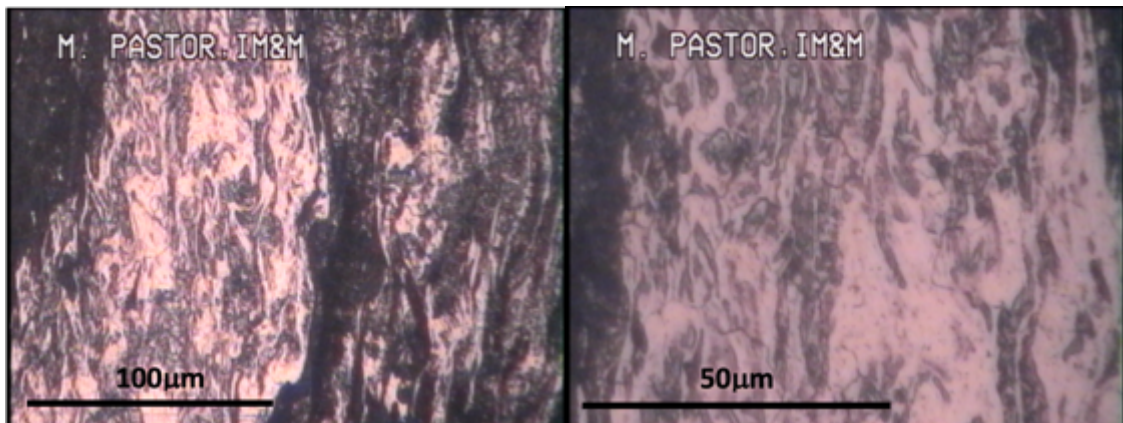
(b)



(c)

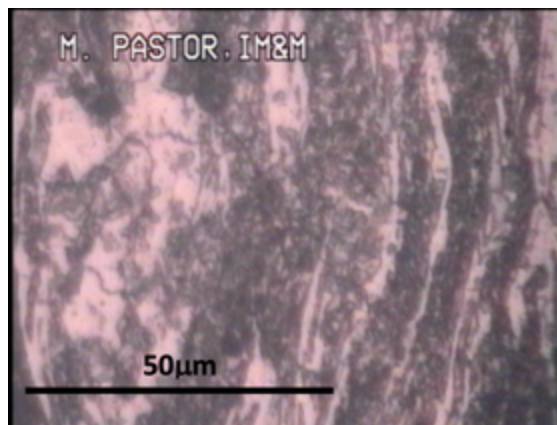
Figura 31-4: Micrografía de la transición entre la ZATM y la ZM (4140) a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta soldada entre AISI 304 y AISI 4140

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.



(a)

(b)



(c)

Figura 32-4: Micrografía de la ZM a) 200x, b) 500x y c) 500x de una probeta soldada entre AISI 304 y AISI 4140

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

4.3.6. Soldadura disímil AISI M303 - AISI 4140

En el caso de estos dos aceros con microestructura martensítica la figura 33-4 del acero 4140 presenta su distribución de manera circular y la figura 34-4 del M303 no presenta cambios en la distribución. En la zona de transición para el acero al cromo figura 35-4 la martensita se encuentra alineada de forma vertical caso contrario lo con el acero al inoxidable que recién presenta ondas en la microestructura como muestra la figura 36-4. La zona de mezclado al igual que la ZATM presenta martensita gruesa que varía dependiendo de la región además de presentar de austenita retenida como muestra la figura 37-4.

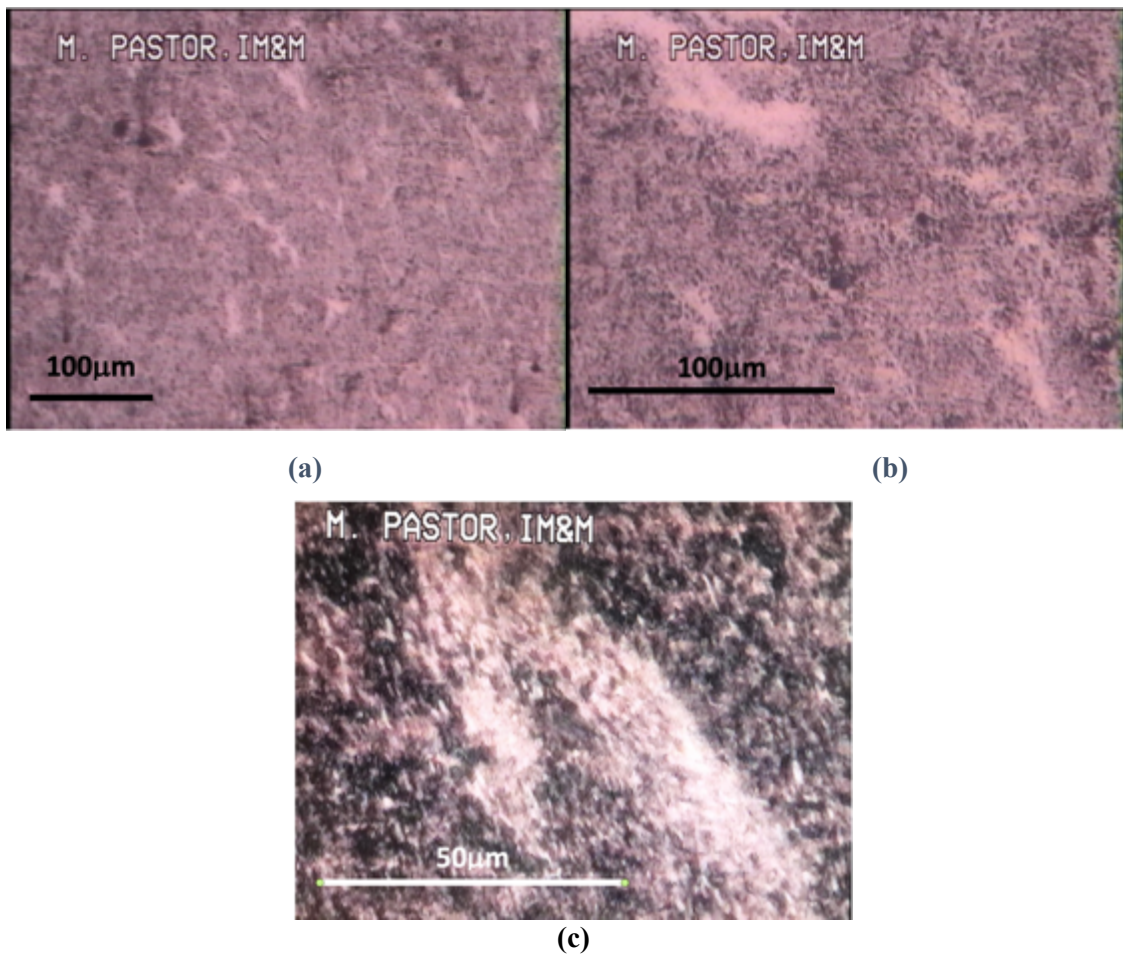


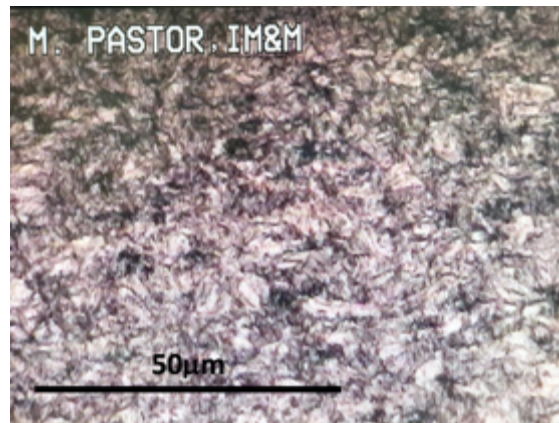
Figura 33-4: Micrografía de la ZATM (4140) a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta soldada entre AISI M303 y AISI 4140

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.



(a)

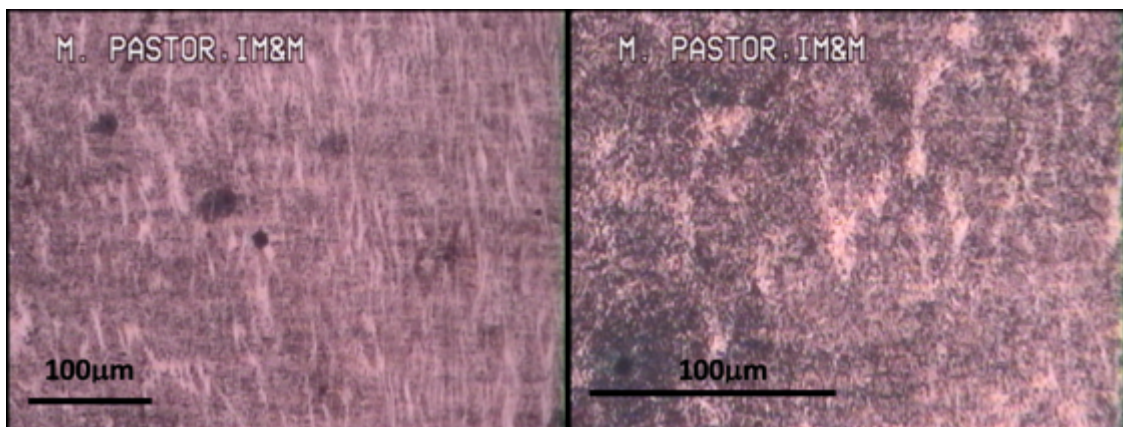
(b)



(c)

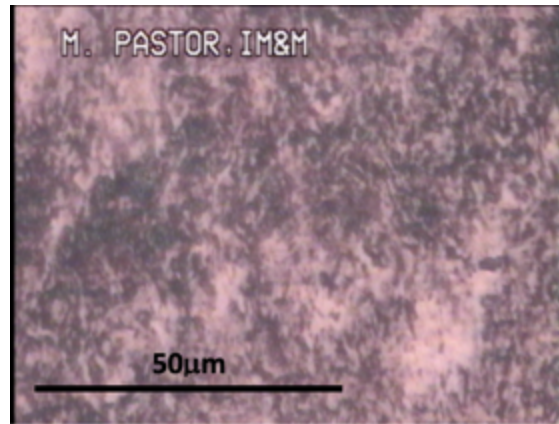
Figura 34-4: Micrografía de la ZATM (M303) a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta soldada entre AISI M303 y AISI 4140

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.



(a)

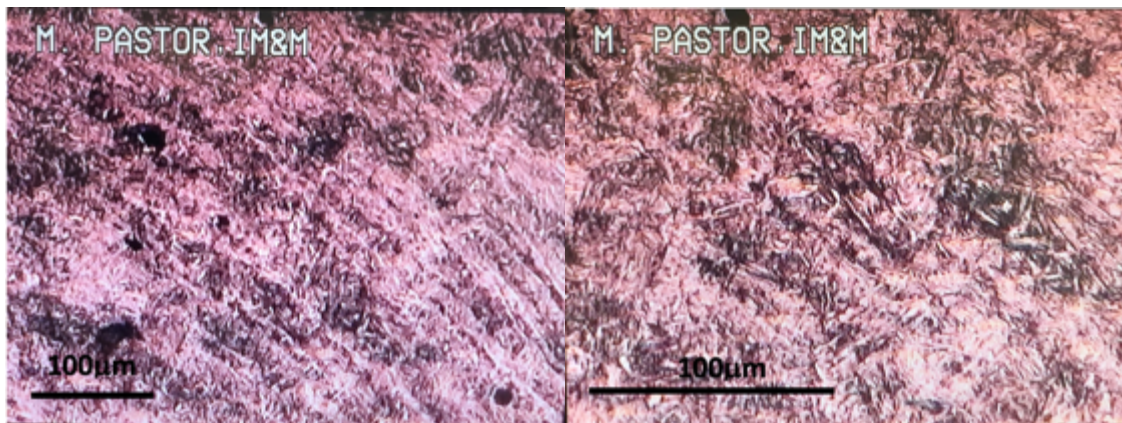
(b)



(c)

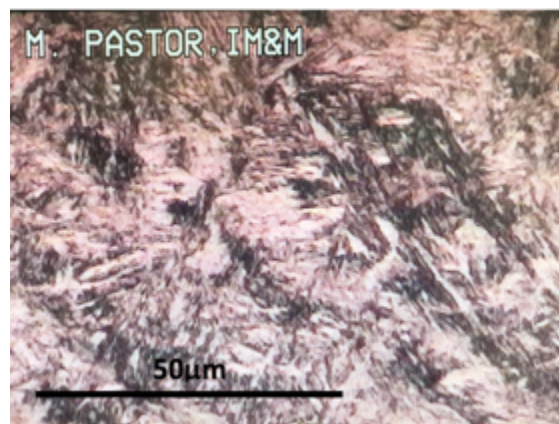
Figura 35-4: Micrografía de la transición entre la ZATM y la ZM (4140) a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta soldada entre AISI M303 y AISI 4140

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.



(a)

(b)



(c)

Figura 36-4: Micrografía de la transición entre la ZATM y la ZM (M303) a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta soldada entre AISI M303 y AISI 4140

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

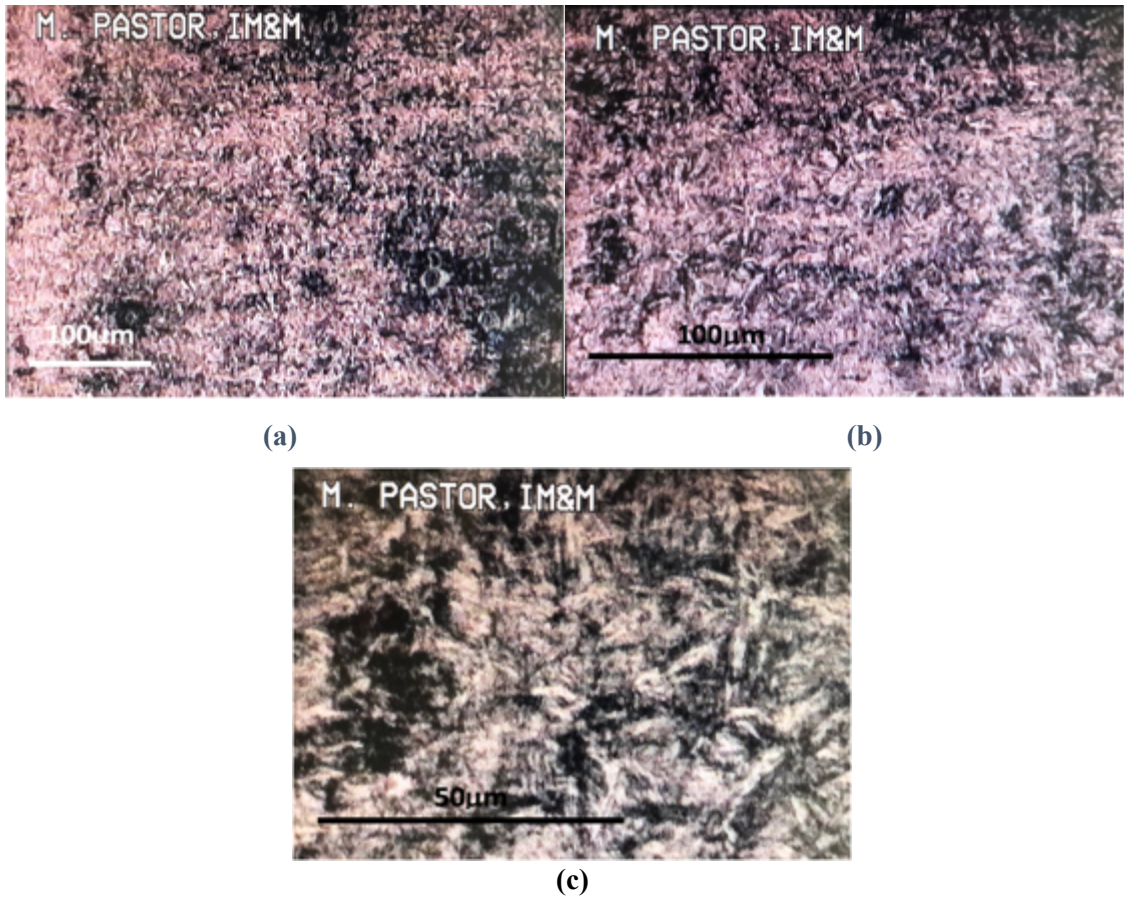


Figura 37-4: Micrografía de la ZM a) 100x, b) 200x y c) 500x de una probeta soldada entre AISI M303 y AISI 4140

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

4.4. Perfil de dureza

Para realizar el perfil de dureza se utiliza los valores que entrega el durómetro, los cuales fueron tomados desde un punto en el metal base en la izquierda, pasando por todas las zonas de la soldadura y terminar en el metal base de la derecha, en la figura 38-4 se muestra el esquema de los puntos donde se tomó la dureza, en la tabla 8-4 y 9-4 se muestra los valores de dureza en las diferentes zonas para soldadura homogénea y disímil respectivamente.

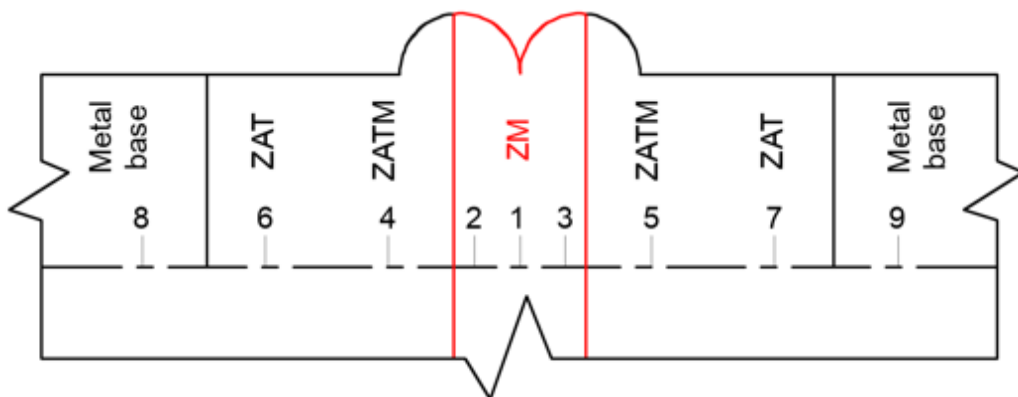


Figura 38-4: Esquema de los puntos donde se tomó la dureza

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

Tabla 8-4: Valores de dureza Rockwell de juntas soldadas entre el mismo material

	Inoxidable austenítico		Inoxidable martensítico		Acero al Cromo 4140	
	Probeta A	Probeta B	Probeta A	Probeta B	Probeta A	Probeta B
Mb izq	38,1	35,6	33,67	34,2	23,5	35,1
Zat izq	12,2	14,7	49,1	47	51,2	44,2
Zatm izq	9,5	12,2	50,5	44,2	54,9	46
Zm izq	12,8	10	50,3	45,9	52	46,2
Zm cent	16,5	19,8	50	45,1	51,9	46,8
Zm der	22	25,3	50,9	45	52,9	47
Zatm der	13,1	18,9	49,5	45,5	53,8	46,1
Zat der	12,4	50,5	53	34,9	37,8	22,1
Mb der	9,6	46,8	46,5	30,3	43,14	35,5

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

Tabla 9-4: Valores de dureza Rockwell de juntas de soldadura disímil

	Inoxidable austenítico - Inoxidable martensítico		Acero al Cromo 4140 - Inoxidable austenítico		Acero al Cromo 4140 - Inoxidable martensítico	
	Probeta A	Probeta B	Probeta A	Probeta B	Probeta A	Probeta B
Mb izq	32	37	33	36,2	27	24,4
Zat izq	18	22	47	43,6	33	31,8
Zatm izq	11	15,6	50	46	40	36,4
Zm izq	24	28,3	48	41	48	45,8
Zm cent	42	38	48	41,9	49,8	47,2
Zm der	40	43,9	28	33	31,9	35
Zatm der	37	41,2	15	18	40	44,2
Zat der	36,5	39	16	20	46,2	43,9
Mb der	33	36,9	33,2	36,9	32,5	34,9

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

Los valores de las durezas están representados en los gráficos 5-4, 6-4 y 7-4 para la soldadura de metales similares, en el acero inoxidable austenítico es visible un decaimiento en la dureza en la ZAT y ZATM debido a que el calor hace crecer los granos de austenita al de disminuir los depósitos de ferrita ubicados en los bordes del grano, en la ZM al ser afectados por el calor y ser la zona más afectada por la aplicación de presión los granos disminuyen en comparación a la ZATM aumentando los valores de las propiedades pero no igualando a las del metal base.

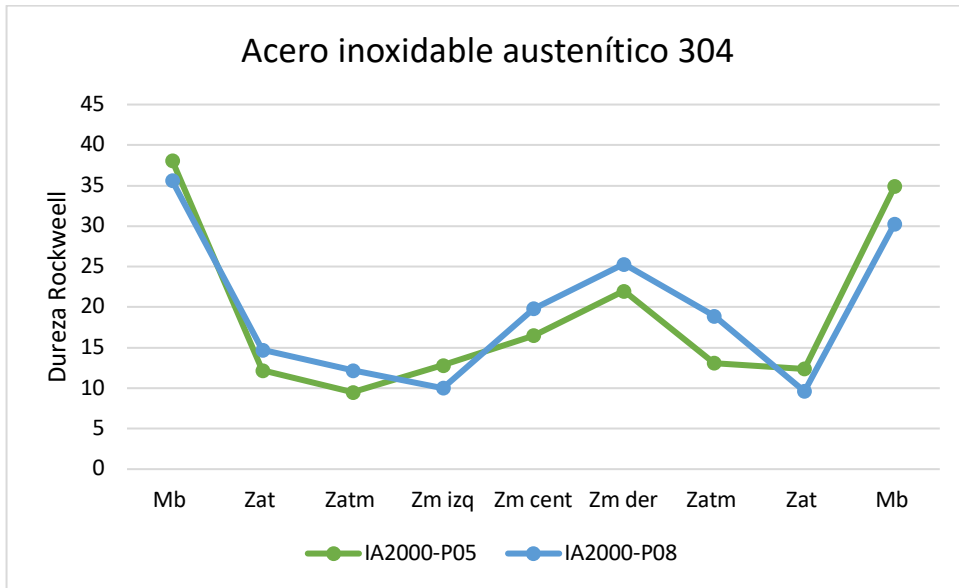


Gráfico 5-4: Perfil de dureza del acero inoxidable austenítico 304

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

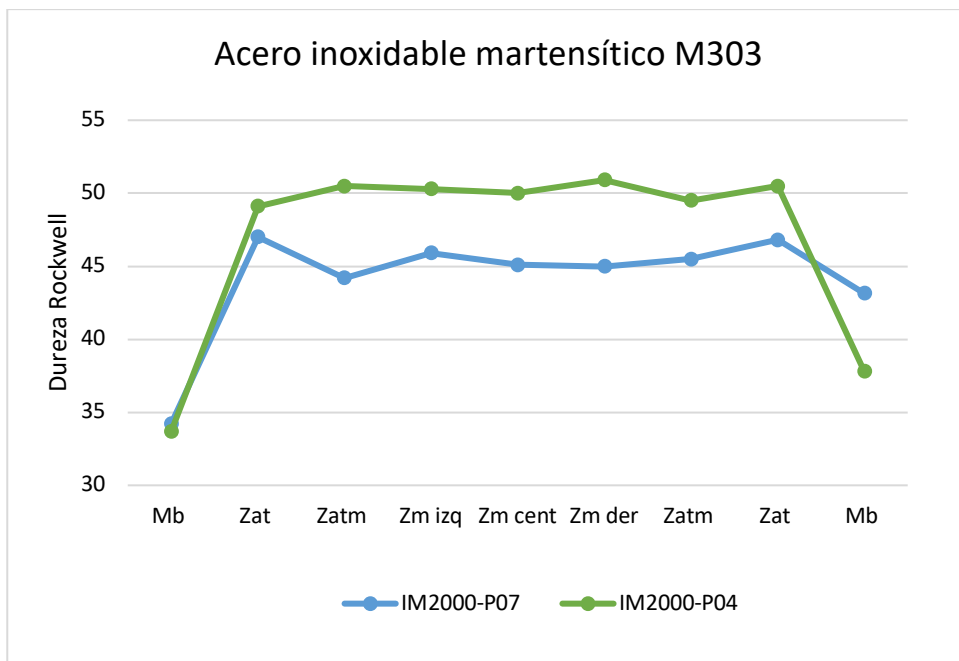


Gráfico 6-4: Perfil de dureza del acero inoxidable martensítico M303

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

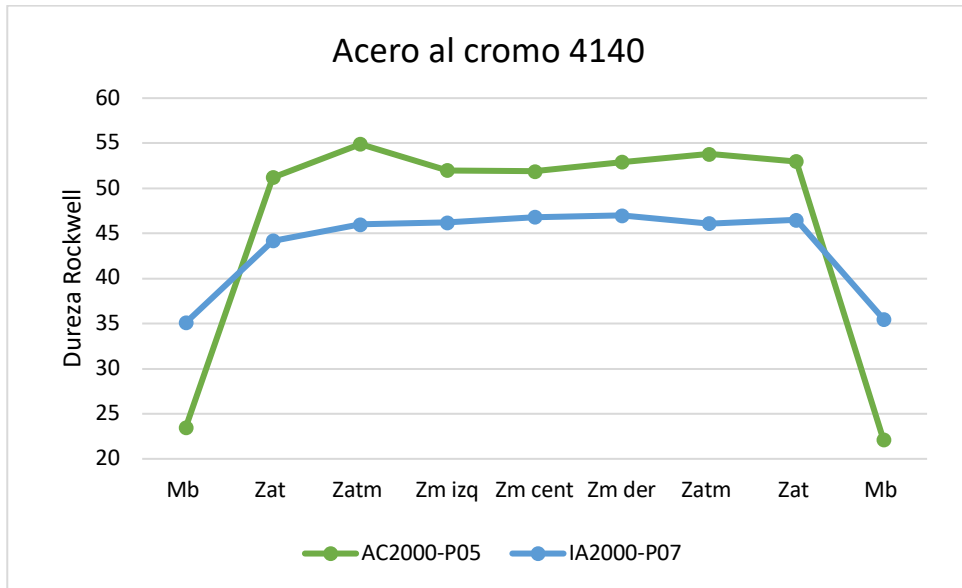


Gráfico 7-4: Perfil de dureza del acero al cromo 4140

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

Para el acero inoxidable martensítico y al cromo que poseen una microestructura de martensita el calor y la presión solo aumentan las propiedades mecánicas al transformar la austenita retenida, llegando a tener durezas de 50 HRC para el M303 y 51,9 HRC para el 4140 en la zona de mezclado.

Para la soldadura disímil se mantiene las observaciones de los aceros anteriores, para los austeníticos el tamaño del grano esta inversamente relacionado con la dureza y las propiedades mecánicas de los martensítico aumenta, esto se visualiza en los gráficos 8-4, 9-4 y 10-4.

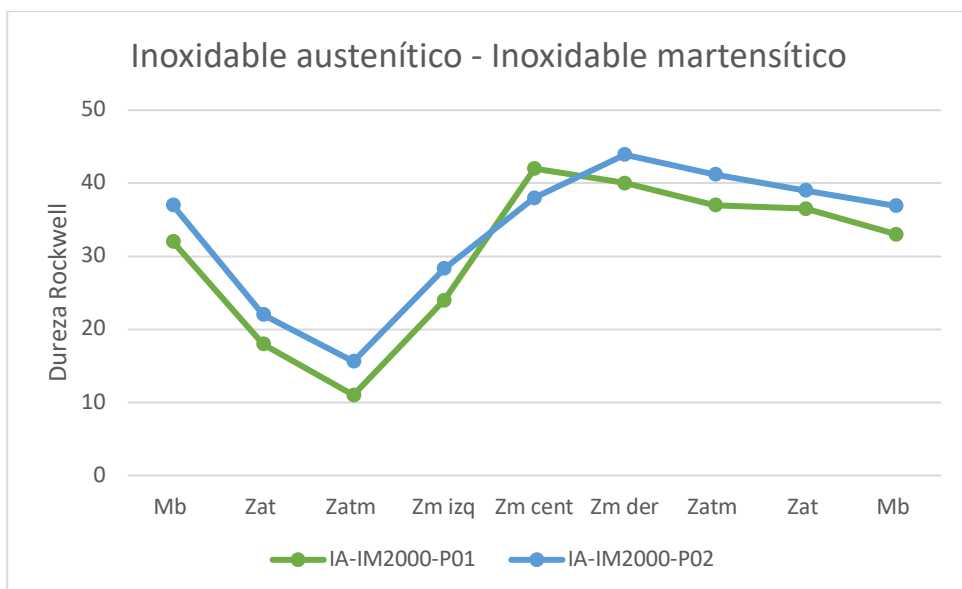


Gráfico 8-4: Perfil de dureza de la soldadura disímil entre un acero inoxidable austenítico 304 y un inoxidable martensítico M303

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

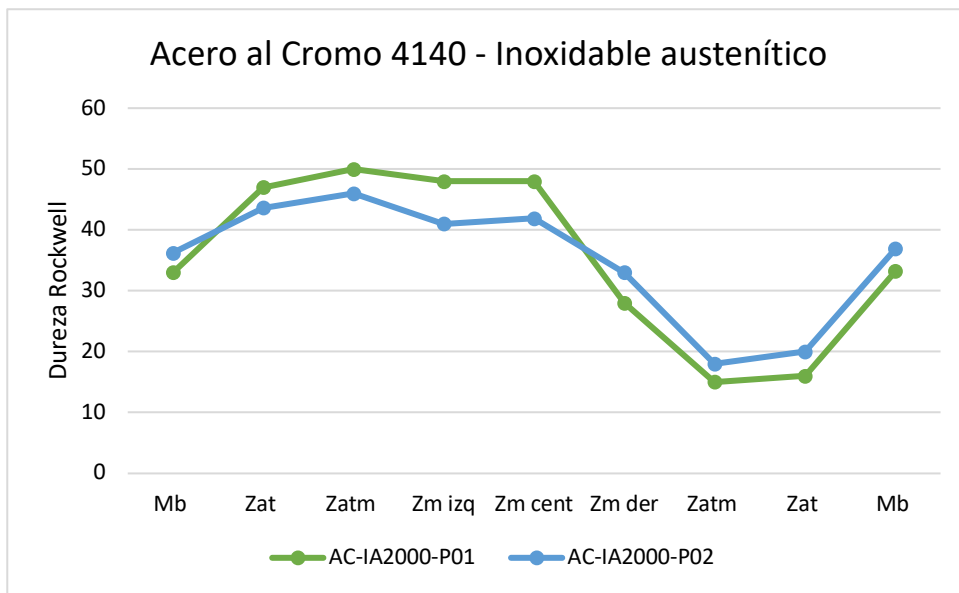


Gráfico 9-4: Perfil de dureza de la soldadura disímil entre un acero al cromo 4140 y un acero inoxidable austenítico 304

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

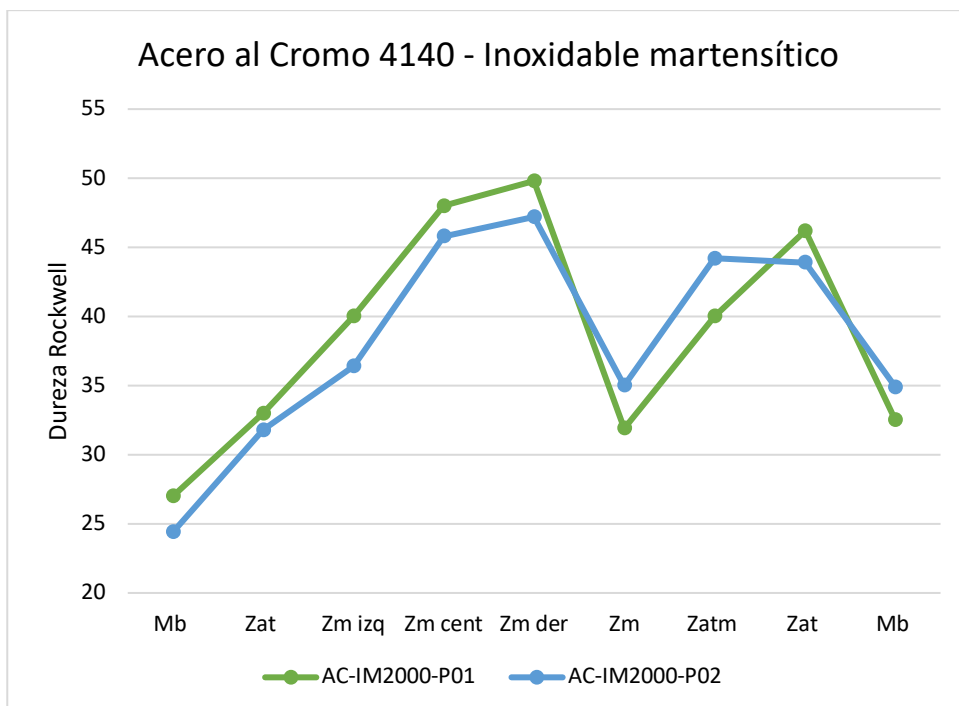


Gráfico 10-4: Perfil de dureza de la soldadura disímil entre un acero al cromo 4140 austenítico y un inoxidable martensítico M303

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

4.5. Perfil de dureza promedio

Con la finalidad de poder comparar los valores de la dureza la tabla 10-4 contiene los valores de la dureza promedio de las soldaduras similares y disímiles, mientras que el gráfico 11-4 muestra el perfil de dureza para poder compararlo.

Tabla 10-4: Valores de dureza promedio Rockwell C

	Acero inoxidable austenítico 304	Acero inoxidable martensítico M303	Acero al cromo 4140	Acero inoxidable austenítico 304 - inoxidable martensítico M303	Acero al cromo 4140 - inoxidable austenítico 304	Acero al cromo 4140 y un inoxidable martensítico
Mb	36,85	33,935	29,3	34,5	34,6	25,7
Zat	13,45	48,05	47,7	20	45,3	32,4
Zatm	10,85	47,35	50,45	13,3	48	38,2
Zm izq	11,4	48,1	49,1	26,15	44,5	46,9
Zm cent	18,15	47,55	49,35	40	44,95	48,5
Zm der	23,65	47,95	49,95	41,95	30,5	33,45
Zatm	16	47,5	49,95	39,1	16,5	42,1
Zat	11	48,65	49,75	37,75	18	45,05
Mb	32,6	40,47	28,8	34,95	35,05	33,7

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

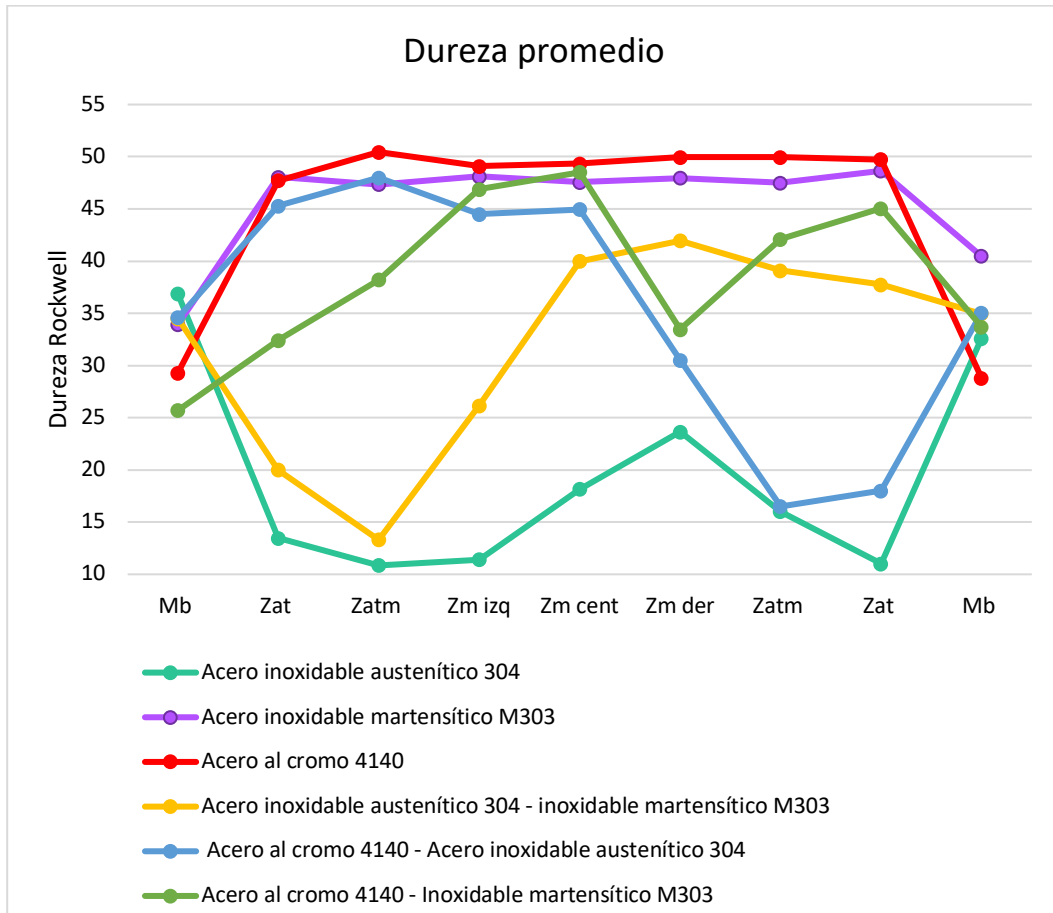


Gráfico 11-4: Perfil de dureza promedio

Realizado por: Pilamunga, Stalyn, 2021.

En el gráfico 11-4 se muestra que en la zona de mezclado la soldadura similar de acero al cromo tiene la dureza más alta con 49,35 HRC, en segundo lugar la soldadura disímil entre el acero inoxidable martensítico y el acero al cromo con 48,5 HRC, la dureza de 47,55 HRC correspondiente a la soldadura similar de acero inoxidable martensítico se encuentra en tercer lugar, como cuarto valor la soldadura disímil entre el inoxidable austenítico y el acero al cromo con 44,95 HRC, el penúltimo valor corresponde a la unión del acero inoxidable austenítico y martensítico con la dureza de 40 HRC y finalmente, la soldadura similar de acero inoxidable austenítico con la 18,15 HRC es la dureza más baja en esta zona. De forma global el valor más alto de dureza pertenece a la ZATM de la soldadura similar de acero al cromo con 50,45 HRC, mientras que el valor más bajo de 10,85 HRC pertenece a la unión del acero inoxidable austenítico.

CONCLUSIONES

La soldadura por fricción rotacional al tratarse de un proceso que pretende unir/fusionar dos metales posee parámetros que van a influir en el acabado final de la junta como lo son: la velocidad angular con la que gire la pieza, el tiempo que se mantengan rozando las superficies en contacto, la presión que se aplica además de otros factores no tan teóricos pero que llegan a repercutir como la composición del material, en el caso de las dimensiones si es muy larga puede pandearse y también afecta el área de contacto, igualmente partículas, óxido, grasa, etc. afectan la zona de mezclado.

La probeta debe ser preparada mediante una operación de cilindrado disminuyendo 2 mm su radio para que cualquier tipo de agente externo no comprometa el estado de la junta. La velocidad angular para las soldaduras similares y disímiles fue de 2000 rpm, igualmente se trató de aplicar la misma fuerza en todos los casos siendo la variable tiempo de calentamiento y de forja las que van a ser mayormente controladas, dando como resultados para obtener juntas completamente soldadas en el caso del acero inoxidable austenítico un tiempo de fricción entre los 55-60 segundos debido a que mayor tiempo proporciona más calor haciendo crecer los granos disminuyendo así las propiedades mecánicas, para el acero inoxidable martensítico el tiempo entre 65-70 segundos, para el acero al cromo al ser martensítico se observó que al aumentar el tiempo a 70-75 segundos era efectivo, en el caso de las soldaduras disímiles en los casos que participe el AISI 304 se trabajó con 65-70 segundos y para el caso de los dos martensíticos 70-75 segundos; para el tiempo de forja con el rango de 20-25 segundos se obtuvieron buenos resultados.

Al tener las probetas hasta un acabado tipo espejo se utiliza para el inoxidable austenítico el reactivo Vilella y para los aceros de microestructura martensítica el reactivo Nital para visualizar las zonas de esta soldadura. Las zonas después de ataque químico son fácilmente identificables por el color son más oscuras al acercarse a la ZM. Para ambos casos de soldadura se identifica que en la ZAT comienza a formarse unas líneas horizontales que conforme se avanza por la ZATM y llegar a la zona de transición para la zona de mezclado han dispuesto la posición de la microestructura de manera vertical. Para los aceros M303 y 4140 la martensita y austenita retenida del metal base ha ido cambiando mientras avanza hasta la MZ convirtiéndose en martensita gruesa y para el 304 el tamaño de los granos de austenita ha ido creciendo y disminuyendo según avanza a la ZM. En las soldaduras disímiles el diagrama de Schaeffler predice correctamente la microestructura final que va a resultar en las juntas como es el caso de la 304-M303 que la ZM presenta martensita, austenita y presencia de ferrita, en la junta 304-4140 la austenita retenida y martensita se hacen presentes y finalmente para la soldadura entre M303-4140 la martensita es la microestructura que se encuentra.

Al poseer cada zona su microestructura, estas poseen su propia dureza con la cual se realiza una al ser medida en todas las zonas y a la izquierda y derecha de la ZM se realiza un perfil con estos

valores. Por lo tanto, por las gráficas y lo anotado anteriormente sobre las microestructuras se concluye que en soldaduras donde esta presente el acero AISI 304 la zona ZATM es la que posee la menor dureza con un valor de 10,48 HRC, caso contrario con la martensita que el valor de la dureza solo incrementa a medida que llega a la zona de mezclado con valores de 50,45 HRC como máximo.

La dureza de las juntas soldadas de manera similar y disímil en la ZM al comportarse de la misma manera, pero al no entregar valores idénticos entre probetas iguales se necesita una gráfica de durezas promedio, la cual ayuda a tener una mejor apreciación visual de la dureza en cada zona de la junta, permitiendo identificar el valor más alto. Las tablas y gráficas permiten concluir que respecto a las soldaduras similares el acero al cromo proporciona la dureza más alta con 49,35 HRC en el lapso de 70-75s de tiempo de fricción, en el caso de las soldaduras disímiles la combinación de acero inoxidable martensítico y acero al cromo tienen una dureza en la ZM de 48,5 HRC y un tiempo de fricción de 70-75s, para ambos casos el tiempo de forja es 20-25s. Los perfiles de dureza también ayudan a entender el impacto de la temperatura y el crecimiento del tamaño de grano en la dureza; las curvas donde interviene el acero inoxidable austenítico presentan los decaimientos más bajos en ZATM que llegan a crecer mientras se acerca a la ZM. Para los aceros con matriz martensítica la curva crece hasta llegar a la ZAT y se mantiene relativamente constante hasta llegar a la ZM.

RECOMENDACIONES

Para evitar el tema del pandeo al realizar el análisis microestructural se observó que las zonas afectadas por el calor no superaban los dos centímetros medidos desde la ZM así que si se consigue sistemas de sujeción que permitan el este agarre se recomienda usarlo.

En el caso de querer mejorar las propiedades mecánicas se recomienda automatizar el proceso debido a que el factor humano influye en la aplicación de presión, en los tiempos de calentamiento y forja al no se tan exactos.

Si se quiere continuar con la investigación se recomienda realizar ensayos de tracción, torsión, fatiga, entre otros para crear una lista mas detalladas de las propiedades de este tipo de soldadura.

BIBLIOGRAFÍA

- AMERICAN WELDING SOCIETY.** *Welding Handbook*. 1975. Ninth. ISBN 9780871710536.
- AMERICAN WELDING SOCIETY.** *Guide for the visual examination of welds*. 2015. Tercera. United States of America: s.n. ISBN 9780871718587.
- ANGAMARCA PUPIALES, A.P. y GARCÍA CLAUDIO, B.S.** *Estudio Y Caracterización De La Soldabilidad En Materiales Disímiles Aluminio (6061) – Latón (C38500) Mediante El Proceso De Soldadura Por Fricción Trabajo* [en línea]. 2018. S.l.: s.n. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19425/1/CD-8815.pdf>.
- ARISTIZABAL CASTRILLÓN, A. y MANRIQUE TORRES, M.R.,** *Ensayos y propiedades de los materiales* [en línea]. 2017. S.l.: s.n. Disponible en: <https://elibro.net/es/lc/epoch/titulos/145913>.
- ARISTIZÁBAL CASTRILLÓN, A. y MANRIQUE TORRES, M.R.,** *Ensayos de dureza* [en línea]. 2017. S.l.: s.n. Disponible en: <https://elibro.net/es/lc/epoch/titulos/145915>.
- ASTM INTERNATIONAL.** ASTM E407-99: Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. *ASTM International*. 2012. West Conshohocken, PA, pp. 1–21.
- BELZUNCE, F.J.** *Aceros Y Fundiciones*. 2001. Universidad de Oviedo.
- CHÁVEZ SARANGO, J.O.** *Estudio de la soldabilidad entre un acero inoxidable y un acero al carbono mediante el proceso de soldadura por fricción* [en línea]. 2017. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17527>.
- DÍAZ DEL CASTILLO, F. y REYES SOLÍS, A.** *Aceros, Estructuras y Tratamientos Termicos*. [en línea], 2012. Disponible en: http://es.slideshare.net/albertojeica/tratamientos-termicos-del-acero?qid=6cea3f32-f69e-4064-b020-3f6d46735ce5&v=qlf1&b=&from_search=1.
- GUZMÁN ROMERO, E.E.** *Efecto del proceso de soldadura por fricción radial en una aleación de aluminio AA 5754*. S.l. 2017. Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
- HERNANDEZ BRITO, M.** *Simulación del proceso de soldadura SMAW en piezas de acero al carbono media aleación (aisi 4140)*. 2018. Corporación mexicana de investigación de materiales.
- IBARRA, M., NÚÑEZ, E. y HUERTA, J.** *Manual Aceros Inoxidables*. 2010. *Indura*, vol1. Marzo, pp. 21–24.
- IVAN BOHMAN,** *Catalogo General IVAN BOHMAN C. A.* [en línea]. 2016. Disponible en: <http://www.ivanbohman.com.ec/wp-content/uploads/2016/01/catalogo-general-IBCA.pdf>.
- LLULLUNA LLUMIQUINGA, F.R.** *Mecánica Procesamiento De Imágenes Mediante Software Libre Python Para El Análisis Metalográfico En Aceros De* [en línea]. 2014. Escuela Politécnica Nacional Facultad De Ingeniería. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/7171/1/CD-5361.pdf>.

- LÓPEZ GONZÁLES, L.R.** *Soldadura por fricción*. 2013. Universidad del Bío-Bío,
- LOZANO GUAMÁN, J.M.** *Análisis de metalográfico de aceros comerciales para herramientas en la ciudad de Cuenca-Ecuador*. 2018. Universidad Politécnica Salesiana.
- MACHINESEEKER.** Torno Z TOS SN 40 B Machineseker. [en línea]. 2019. [Consulta: 22 septiembre 2021]. Disponible en: <https://www.machineseker.mx/tos-sn+40+b/i-5843220>.
- MALDONADO, J.** *Aceros y sus Aplicaciones*. Universidad Autónoma de Nuevo León [en línea] 1996. pp. 142. Disponible en: <http://eprints.uanl.mx/421/1/1020118272.PDF>.
- MATERIAL MUNDIAL.** Acero Inoxidable AISI 304 Ficha Técnica, Propiedades, Densidad, Dureza - Material Mundial Grados. *Ficha Técnica Acero Inoxidable* [en línea]. 2020a. [Consulta: 21 septiembre 2021]. Disponible en: <https://www.materialmundial.com/sae-aisi-acero-4140-ficha-tecnica-propiedades/>.
- MATERIAL MUNDIAL.** Acero Inoxidable AISI 304 Ficha Técnica, Propiedades, Densidad, Dureza - Material Mundial Grados. *Ficha Técnica Acero Inoxidable* [en línea]. 2020b. [Consulta: 12 julio 2021]. Disponible en: <https://www.materialmundial.com/acero-inoxidable-ss-astm-sae-aisi-304-ficha-tecnica/>.
- MECANIZADOS CORDOVA,** *Manual De Mantenimiento* [en línea]. 2015 ISBN 9788578110796. Disponible en: http://repositorio.sena.edu.co/sitios/fedemetal_manual_mantenimiento/#.
- MERINO CASALS, C.,** *Aceros Inoxidables* [en línea]. 2017. Primera. Dextra Editorial. Disponible en: <https://elibro.net/es/lc/epoch/titulos/139749>.
- MORENO SIEGERT, E.** *Soldadura por fricción*. 2008. Universidad EAFIT, Medellín
- NATERA, L., CAÑA, M., GUAYAPERO, O. y HERNÁNDEZ, M.,** *Aceros y fundiciones*. 2017. Universidad Tecnológica del Centro, Chile
- PENDER, J.A.,** *Soldadura*. 1989. Tercera Ed. Mexico D.F. pp. 189-203
- PÉREZ ENRIQUEZ, R.D.** *Soldadura por Fricción-Revolución (FSW) en Aleaciones de Aluminio 7075*. [en línea], 2018. pp. 40. Disponible en: <https://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/7432/1/138718.pdf>.
- PUREST,** *Manual de diseño para acero inoxidable estructural* [en línea]. 2002. Disponible en: <http://www.steel-stainless.org/media/1462/dmsss-4th-ed-spanish.pdf>.
- REYES OSORIO, L.A.** Modelado de la evolución microestructural durante el forjado en caliente. 2013. pp. 13–14. Universidad Autónoma De Nuevo León, San Nicolás De Los Garza.
- RODRÍGUEZ ROMO, G.** La ciencia para todos Hierro, Aceros y fundiciones. En: U.P.C. BONATERRA (ed.), *Materiales para el diseño II* [en línea]. 2017. Universidad Panamericana Campus Bonaterra, Disponible en: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/158/html/sec_4.html.
- RUIZ, D.H.** *Fundamentos y ensayos en materiales metálicos*. 2006. Argentina: MDC MACHINE

S. A. ISBN 9500005476.

- SILVA QUINTERO, F.J. y IDROVO TITUAÑA, V.E.** *Elaboración de una práctica recomendada en procesos de caracterización de materiales ferrosos y no ferrosos para los equipos de laboratorio de la universidad politécnica salesiana.* 2019. Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca.
- SMITH, W. y HASHEMI, J.** *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería Materiales* [en línea]. 2014. México D.F.: McGRAWHILL. ISBN 9701056388. Disponible en: <https://chirinosilvaroger.files.wordpress.com/2012/05/fundamentos-de-la-ciencia-e-ingenieria-de-materiales-4ta-edicion-3b3n-william-f-smith-javad-hashemi.pdf>.
- STRUERS.** Ensayo de dureza Brinell. [en línea]. 2020a. [Consulta: 19 noviembre 2021]. Disponible en: <https://www.struers.com/es-ES/Knowledge/Hardness-testing/Brinell#introduction>.
- STRUERS.** Ensayos de dureza Rockwell | Struers.com. [en línea]. 2020b. [Consulta: 19 noviembre 2021]. Disponible en: <https://www.struers.com/es-ES/Knowledge/Hardness-testing/Rockwell#introduction>.
- THYSSENKRUPP.** Acero 4140. [en línea], 2010. pp. 1–5. [Consulta: 21 septiembre 2021]. Disponible en: <https://www.ferrocortes.com.co/acero-4140/>.
- TOAPANTA BAUTISTA, R.** *Estudio del proceso de soldadura por fricción agitación (FSW) y su incidencia sobre las propiedades mecánicas en uniones de perfiles de aluminio.* [en línea]. 2015. Universidad Técnica De Ambato. Disponible en: <http://repo.uta.edu.ec/bitstream/handle/123456789/5301/Mg.DCEv.Ed.1859.pdf?sequence=3>.
- VILLARREAL GUZMÁN, O.E.,** *Efecto de la soldadura por fricción rotativa en la microdureza fatiga y microestructura en juntas soldadas de aceros al carbono e inoxidables.* 2007. Trujillo-Perú.
- VILLAVICENCIO CEVALLOS, J.C.** *Relación, microestructura/propiedad en la soldadura gtaw entre aceros inoxidables y aceros al carbono* [en línea]. 2011. Escuela Superior Politécnica De Chimborazo. Disponible en: <http://dspace.espace.edu.ec/bitstream/123456789/1484/1/85T00206.pdf>.
- WILLIAM D. CALLISTER, J.,** *Ciencia e Ingeniería de los Materiales.* 2012. Barcelona: Reverté, S.A. ISBN 9788429172539.

ANEXOS

Anexo A: Catálogo del acero al cromo AISI 4140.

► Cód. IBCA: 709 ≅ 42 CrMo4 ≅ AISI 4140



Información general

709 es un acero aleado para construcción de maquinaria, que posee una alta resistencia especialmente en medidas pequeñas y medianas. Como norma, el 709 es suministrado templado y revenido (temple tenaz bonificado), por lo que no se requeriría un tratamiento térmico posterior, a no ser que así lo exija la aplicación y en ese caso, se templaría en aceite para obtener propiedades mecánicas más elevadas.

709 es apropiado para templarse por flama e inducción y susceptible de nitrurar.

Análisis típico %	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
42CrMo4	0,38 - 0,45	< 0,30	0,60 - 0,90	0,025	0,025	0,90 - 1,20	0,15 - 0,30
AISI 4140	0,38 - 0,43	0,15 - 0,35	0,75 - 1,00	0,030	0,040	0,80 - 1,10	0,15 - 0,25
Código de color	Dorado / Verde						
Equivalencias	AISI / SAE (4140) Din (42CrMo4)		W.Nr (1.7225) JIS (SCM4)		AFNOR (42CD4)		

Aplicaciones

- 1.- Industria Automotriz**
Ejes, bielas, árboles de transmisión, cigüeñales, etc.
- 2.- Maquinaria**
Engranajes de temple por flama, inducción o nitruración, partes de bombas, ejes de reductores, árboles de turbinas a vapor, tornillería de alta resistencia.
- 3.- Industria petrolera**
Taladros, brocas, barrenos, cuerpos de escañadores, vástagos de pistón.

Propiedades mecánicas

En condición de suministro

Resistencia a la tracción	90 - 105 kg/mm ²
Esfuerzo de cedencia	70 kg/mm ²
Elongación, A5	min 12 %
Reducción de área, Z	min 50 %
Resistencia al impacto, KU	aprox. 25 J
Dureza	275 - 320 HB

Nota: Estas propiedades mecánicas se dan hasta a 100 mm. Medidas mayores, favor consultar.

Tratamiento térmico

Recocido blando

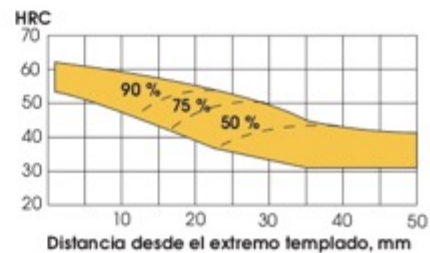
(680 - 720 °C): Mantener a la temperatura por 2 horas. Enfriar en el horno con una velocidad de 15 °C/h hasta los 600 °C y luego libremente al aire.

Alivio de tensiones

(450 - 650 °C): El acero templado tenaz deberá ser calentado hasta aproximadamente 50 °C por debajo de la temperatura usada para el revenido (como standard el 709 es suministrado revenido a 600 °C). Mantenerlo a esta temperatura durante 1/2 a 2 horas. Enfriar en el horno hasta los 450 °C y luego libremente al aire.

Temple

(830 - 850 °C). Con enfriamiento en aceite: El tiempo de mantenimiento en minutos cuando ha alcanzado la temperatura de temple es 0.7 x espesor o diámetro en milímetros. Interrumpir el enfriamiento a los 125 °C y luego revenir inmediatamente.



Anexo B: Catálogo del acero inoxidable AISI 304.

IVAN BOHMAN C.A maneja las siguientes calidades de aceros inoxidable:

Composición química

Análisis típico %	% C	% Si	% Mn	% P Máx.	% S	% Cr	% Ni	% Mo
304	≤ 0.08	≤ 1.00	≤ 2.00	≤ 0.045	≤ 0.015	18.0 - 20.0	8.0 - 10.5	---
316 L	≤ 0.03	≤ 1.00	≤ 2.00	≤ 0.045	≤ 0.015	16.0 - 18.0	10.0 - 14.0	2.0 - 3.0
430	≤ 0.08	≤ 1.00	≤ 1.00	≤ 0.040	≤ 0.015	16.0 - 18.0	---	--
420 mod	0.36 - 0.45	≤ 1.00	≤ 1.00	0.030	0.030	12.5 - 14.5	≤ 1.00	--

Equivalencias y propiedades

AISI	Resistencia a la tracción (kg/mm ²)	Resistencia a la cedencia min.(kg/mm ²)	Elongación %	Dureza HB (máx)	W.Nr	European Designation
304	54	21	58 min	190	1.43012	X5CrNi18-10
316-L	53	24	50	200	1.4404	X2CrNiMo17-3-2
430	53	26	40	180	1.4016	X6Cr17
420 mod	--	--	--	241	1.2083	X41Cr13

Aceros con L: 304-L y 316-L tiene ventajas sobre los aceros inoxidables 304 y 316, en cuanto a su mejor soldabilidad. Al tener los aceros con L menor contenido de carbono, disminuye su capacidad precipitación de carburos al ser soldados, por lo que las zonas afectadas por el calor tienen mejor resistencia a la corrosión que los aceros convencionales 304 y 316. Esto es sumamente importante, cuando el medio corrosivo es crítico, como en el caso de alimentos y ácidos.

Barras de acero inoxidable

Tratamiento térmico

Recocido: deben ser recocido aproximadamente 1050-1070 °C, sosteniéndolo a esa temperatura durante un periodo corto (1/2 hora) y después enfriándolos rápidamente, de preferencia en agua. El enfriamiento al aire debe hacerse solamente en caso de que se trate de un material muy delgado.

Temple: los acero inoxidable austeníticos 304 y 316-L no tiene la característica de endurecerse por temple.

Forja: 1200 °C.

Soldadura de acero inoxidable

Aceros AISI 304:

Recomendamos electrodos recubiertos AWS E308L-17. En nuestra marca ESAB corresponde a electrodos OK 61.30 en soldadura TIG, la norma AWS indica ER 308LSI.

Aceros AISI 316:

Recomendamos electrodos recubiertos AWS E316-17. En nuestra marca ESAB corresponde a electrodos OK 63.30.

Acabado superficial:

No use productos o abrasivos de hierro, para evitar incrustaciones de estas particular e inicio de corrosión localizada. Utilizar los parámetros del fabricante para pulir con maquinas, con el fin de evitar calentamientos localizados que inicien corrosión.

Cuando las operaciones de transformación han provocado la incrustación de partículas ferrosas, puede utilizarse un tratamiento de descontaminado con solución:

1. Acido nítrico 52 % (36 ° Be) 250l
2. Agua 750l

* Esta solución a temperatura ambiente durante una hora.

Gel H500:

Para decapar los cordones de soldadura u otras superficies contaminadas por partículas de hierro, ponemos a su disposición nuestro gel decapante H500.

