



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



## ESTUDIO DE LA CORROSIÓN PRODUCIDA EN ACEROS ASTM A178 EN PROCESOS DE SOLDADURA TIG

Girón Quiñones, Manuel Enrique

Montaño Bermúdez, Ana Cristina

Naguanagua, Agosto de 2009



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



## ESTUDIO DE LA CORROSIÓN PRODUCIDA EN ACEROS ASTM A178 EN PROCESOS DE SOLDADURA TIG

*Trabajo especial de grado presentado ante la Ilustre Universidad de  
Carabobo para optar al título de Ingeniero Mecánico*

**Tutor académico:**

Nombre del Tutor. *Ing. Franklin Camejo*

**Autores:**

Girón Q., Manuel Enrique

Montaño B., Ana Cristina

Naguanagua, Agosto de 2009



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



## ESTUDIO DE LA CORROSIÓN PRODUCIDA EN ACEROS ASTM A178 EN PROCESOS DE SOLDADURA TIG

*Trabajo especial de grado presentado ante la Ilustre Universidad de  
Carabobo para optar al título de Ingeniero Mecánico*

Girón Quiñones, Manuel Enrique

Montaño Bermúdez, Ana Cristina

Naguanagua, Agosto de 2009



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



### **Certificado de Aprobación**

Los abajo firmantes, miembros del jurado designado para evaluar el Trabajo Especial de Grado I titulado “*Estudio de la corrosión producida en aceros ASTM A178 en procesos de soldadura TIG*”, realizado por los bachilleres: Ana C. Montaña B.; CI: 18.781.077 y Manuel E. Girón Q.; CI: 18.686.359, hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo.

---

Ing. Franklin Camejo.

**TUTOR**

---

Ing. Juan Pereira.

**JURADO**

---

Ing. Luis Sidorovas.

**JURADO**

Valencia, Agosto de 2009

# *Dedicatoria*

---

En primer lugar a Dios, por brindarme vida y salud para culminar esta etapa de mi vida.

A mis padres Leandro Girón y Elena Quiñones, por darme la vida, por estar siempre presentes aconsejándome, apoyándome y dándome su amor incondicional. Por luchar cada día para brindarme lo necesario para mis estudios y hacer de mí el hombre que soy. A ellos dedico mi trabajo especial de grado y mi desarrollo como profesional, todo lo que soy se los debo a ellos.

A mis hermanos Aura y Alejandro que con cariño, compañía y ayuda contribuyeron a lograr esta meta de mi vida, gracias por existir.

A mis tías, Nancy, Rosita y Beatriz, por su apoyo. Por estar siempre pendiente de mí y dispuestas a ayudarme en cualquier situación.

A Nayreth Alejandra, por haberme acompañado durante todo este camino; con su cariño, alegría y apoyo incondicional. Por sus consejos, por su amistad, solidaridad y por ayudarme a levantar cuando tropezaba y darme ánimo para seguir luchando. Por tantos momentos de tristeza y alegría que compartimos juntos. Gracias por ser como eres.

A mis amigos, Ana, Jorge y Julio, quienes con su amistad, sus consejos, solidaridad y ayuda, acertaron el camino y lo hicieron menos duro. Por estar ahí siempre, en los momentos buenos y malos.

A todo aquél que por mi se alegre.

*Manuel Enrique Girón Quiñones*

# *Dedicatoria*

---

Primeramente a Dios que me da la fuerza para avanzar cada día.

A mis padres y a mi hermana Juana Bermúdez, Saúl Montaña y Mariela Montaña por apoyarme incondicionalmente a lo largo de la carrera, especialmente a mi madre quien ha sido mi amiga, mi ejemplo a seguir y mi principal apoyo en todo momento.

A mi padrino Héctor Villasmil que me ha apoyado y ha sido un segundo padre para mí.

Al señor Luis Palencia por todo su apoyo.

A mi padrino Luis Alfredo Battistini que fue mi inspiración para dedicarme a esta carrera.

A mis tíos Carmen Bermúdez, Rosa Bermúdez y Jorge Montaña por contar con ellos en cualquier momento que los necesite.

A mis amigos Nayreth, Manuel, Julio, Amanda, Jorge y Estefanía por apoyarme cada día y darme ánimos para seguir adelante.

A la familia de mi compañero de tesis, familia Girón, por prestarnos su casa y su ayuda en todo momento.

A todas aquellas familias que en algún momento de la carrera me albergaron en su casa.

*Ana Cristina Montaña Bermúdez.*

# *Agradecimientos*

---

Presentamos nuestros sinceros agradecimientos a todos los que nos ayudaron a alcanzar la culminación de nuestro trabajo especial de grado:

A la Universidad de Carabobo, por permitir nuestra preparación en sus aulas para convertirnos en profesionales íntegros.

Al profesor Francisco Delfino, por brindarnos parte de su tiempo para la realización de este trabajo.

Al Sra. Arelis, secretaria del departamento de materiales, por su colaboración.

A los tesistas Ángela Yépez y Jhonatan Affaqui por su colaboración durante los ensayos de corrosión.

Al profesor Franklin Camejo por su colaboración, apoyo y ayuda.

A nuestros Padres que sin su colaboración y ayuda no hubiese sido posible este trabajo de grado.

*Ana Montaña y Manuel Girón*

# *Resumen*

---

---

En el estudio se presentó la susceptibilidad a la corrosión del proceso de soldadura TIG bajo tres valores diferentes de intensidad de corriente, baja (60-70A), media (70-80A) y alta (80-90A), en juntas soldadas a tope de acero ASTM A178 grado A, utilizando electrodo EWTh-2 de 2,4 mm de diámetro, gas Argón al 99,99% y a una velocidad de avance de 200 mm/min, mediante la determinación del cambio en las propiedades mecánicas. Este tipo de soldadura se realiza con frecuencia en las aplicaciones del material de estudio; intercambiadores de calor, calderas pirotubulares, tuberías de vapor entre otros. El material se endureció en la soldadura y sus adyacencias debido a la formación de martensita. Para acelerar el proceso de corrosión se realizaron ensayos en una cámara de niebla salina según la norma ASTM B117 – 07, con tres diferentes períodos de exposición. En todas las superficies expuestas al medio corrosivo se manifestó corrosión de tipo uniforme o generalizada lo que ocasionó pérdida de peso y por consiguiente una reducción en el área transversal. En las uniones soldadas se registró corrosión localizada por grietas debido a que no hubo suficiente penetración del cordón de soldadura, quedando una ranura (zona donde no hubo fusión) por la que penetró el fluido corrosivo debilitando la soldadura. Las propiedades mecánicas más afectadas por la corrosión fueron la resistencia a la tracción y el porcentaje de elongación; ambos disminuyeron.

# Índice de figuras

<b>FIGURAS</b>	<b>Pág.</b>
1.1. Tubería de caldera corroída.	2
2.1. Clasificación de los aceros.	13
2.2. Clasificación de procesos de manufactura.	17
2.3. Diagrama de la clasificación de la soldadura.	19
2.4. Soldadura por arco eléctrico.	20
2.5. Soldadura con electrodo refractario (método TIG).	21
2.6. Soldadura con electrodo consumible (método MIG y MAG).	21
2.7. Esquema de un sistema para soldadura de arco TIG.	25
2.8. Ilustración de las dos posibles polaridades.	26
2.9. Esquema de un soplete para soldadura TIG.	27
2.10. Formas posibles para electrodos de tungsteno.	28
2.11. Ciclo que sigue el hierro hasta volver a su estado estable.	34
2.12. Dirección de la corriente positiva en una pila seca.	36
3.1. Representación de los anillos para las probetas de tracción obtenidos mediante el corte de los tubos.	48
3.2. Representación de los anillos para las probetas de dureza y metalografía obtenidos mediante el corte de los tubos.	49
3.3. Máquina para soldadura automática utilizada.	50
3.4. Pinzas orbitales utilizadas.	51
3.5. Esquema de los sectores imaginarios en los que se dividió la circunferencia.	53
3.6. Localización del corte para la probeta de tracción longitudinal a la tubería.	57
3.7. Esquema de la probeta soldada para tracción.	57
3.8. Dimensiones para las probetas de tracción.	58
3.9. Dimensiones para las probetas de dureza y metalografía.	59
3.10. Máquina de ensayo universal en materiales.	60

3.11. Máquina universal de ensayos mecánicos utilizada.	63
3.12. Equipos utilizados para la preparación de las probetas.	67
3.13. Microscopio electrónico.	68
3.14. Zonas originadas luego del proceso de soldadura.	70
3.15. Microdurómetro utilizado en los ensayos.	70
4.1. Gráfica de esfuerzo-deformación ingenieril de dos probetas para la caracterización.	73
4.2. Gráfica de esfuerzo-deformación ingenieril con líneas de relación de la Ley de Hooke.	74
4.3. Gráfica de Microdureza de cada tubo.	77
4.4. Microscopía del primer tubo.	78
4.5. Microscopía del segundo tubo.	79
4.6. Microscopía del tercer tubo.	79
4.7. Microscopía del cuarto tubo.	79
4.8. Microscopía del quinto tubo.	80
4.9. Microscopía a 500X del acero ASTM A178	80
4.10. Ensayos de tracción de las probetas soldadas con intensidad de corriente baja.	81
4.11. Ensayos de tracción de las probetas soldadas con intensidad de corriente media.	82
4.12. Ensayos de tracción de las probetas soldadas con intensidad de corriente alta.	83
4.13. Gráfica de comparación de esfuerzos obtenidos a través del ensayo de tracción.	84
4.14. Gráfica de comparación del porcentaje de reducción de área y del porcentaje de elongación obtenido a través del ensayo de tracción.	85
4.15. Gráfica de Microdureza de muestras soldadas con intensidad de corriente baja.	87
4.16. Gráfica de Microdureza de muestras soldadas con intensidad de corriente media.	88
4.17. Gráfica de Microdureza de muestras soldadas con intensidad de corriente alta.	89
4.18. Microscopía de las muestras soldadas con intensidad de corriente baja.	90
4.19. Microscopía de las muestras soldadas con intensidad de corriente media.	91
4.20. Microscopía de las muestras soldadas con intensidad de corriente alta.	91
4.21. Pesaje de una probeta antes de ser sometida a corrosión.	92
4.22. Disposición de las probetas en la cámara de niebla salina estándar	93
4.23. Resultado de las muestras expuestas a corrosión durante 7 días.	94
4.24. Pérdida de peso de las muestras para tracción.	95
4.25. Ensayos de tracción de las probetas soldadas con intensidad de	96

corriente baja sometidas a corrosión durante dos días.	
4.26. Ensayos de tracción de las probetas soldadas con intensidad de corriente baja sometidas a corrosión durante cuatro días.	97
4.27. Ensayos de tracción de las probetas soldadas con intensidad de corriente baja sometidas a corrosión durante siete días.	99
4.28. Ensayos de tracción de las probetas soldadas con intensidad de corriente media sometidas a corrosión durante dos días.	100
4.29. Ensayos de tracción de las probetas soldadas con intensidad de corriente media sometidas a corrosión durante cuatro días.	101
4.30. Ensayos de tracción de las probetas soldadas con intensidad de corriente media sometidas a corrosión durante siete días.	103
4.31. Gráfica de comparación de esfuerzos obtenidos a través del ensayo de tracción.	104
4.32. Gráfica de comparación del porcentaje de reducción de área y del porcentaje de elongación obtenido a través del ensayo de tracción.	105
4.33. Ensayos de tracción de las probetas soldadas con intensidad de corriente alta sometidas a corrosión durante dos días.	106
4.34. Ensayos de tracción de las probetas soldadas con intensidad de corriente alta sometidas a corrosión durante cuatro días.	107
4.35. Ensayos de tracción de las probetas soldadas con intensidad de corriente alta sometidas a corrosión durante siete días.	108
4.36. Gráfica de comparación de esfuerzos obtenidos a través del ensayo de tracción.	109
4.37. Gráfica de comparación del porcentaje de reducción de área y del porcentaje de elongación obtenido a través del ensayo de tracción.	110
4.38. Gráfica de dureza - Zona de estudio para las muestras soldadas con intensidad de corriente baja sometidas a corrosión durante dos días.	112
4.39. Gráfica de dureza - Zona de estudio para las muestras soldadas con intensidad de corriente baja sometidas a corrosión durante cuatro días.	113
4.40. Gráfica de dureza - Zona de estudio para las muestras soldadas con intensidad de corriente baja sometidas a corrosión durante siete días.	115
4.41. Gráfica de comparación de los valores de dureza obtenidos para las muestras de intensidad de corriente baja.	116
4.42. Gráfica de dureza - Zona de estudio para las muestras soldadas con intensidad de corriente media sometidas a corrosión durante dos días.	118
4.43. Gráfica de dureza - Zona de estudio para las muestras soldadas con intensidad de corriente media sometidas a corrosión durante cuatro días.	120
4.44. Gráfica de dureza - Zona de estudio para las muestras soldadas	121

con intensidad de corriente media sometidas a corrosión durante siete días.	
4.45. Gráfica de comparación de los valores de dureza obtenidos para las muestras de intensidad de corriente media.	122
4.46. Gráfica de dureza - Zona de estudio para las muestras soldadas con intensidad de corriente alta sometidas a corrosión durante dos días.	124
4.47. Gráfica de dureza - Zona de estudio para las muestras soldadas con intensidad de corriente alta sometidas a corrosión durante cuatro días.	125
4.48. Gráfica de dureza - Zona de estudio para las muestras soldadas con intensidad de corriente alta sometidas a corrosión durante siete días.	126
4.49. Gráfica de comparación de los valores de dureza obtenidos para las muestras de intensidad de corriente alta.	127
4.50. Microscopía (sin ataque) a 1000X de la sección transversal de una muestra expuesta a corrosión durante cuatro días.	128
4.51. Microscopía (sin ataque) a 1000X de la sección transversal de una muestra expuesta a corrosión durante siete días.	129
4.52. Microscopía a 100X (sin ataque) de la sección transversal de una muestra soldada con intensidad de corriente media expuesta a corrosión durante siete días.	130
4.53. Microscopía a 100X (sin ataque) de la sección transversal de una muestra soldada con intensidad de corriente alta expuesta a corrosión durante siete días.	131
4.54. Microscopía a 400X de la sección transversal de una muestra expuesta a corrosión durante cuatro días.	131
4.55. Microscopía a 400X de la sección transversal de una muestra expuesta a corrosión durante siete días.	132

# Índice general

Índice general	i	
Índice de figuras	v	
Índice de tablas	ix	
Introducción	xiii	
<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>El Problema</b>	<b>1</b>
1.1	Situación problemática	1
1.2	Objetivos	3
1.2.1	<i>Objetivo General</i>	3
1.2.2	<i>Objetivos Específicos</i>	3
1.3	Justificación	4
1.4	Alcance	4
1.5	Limitaciones	5
1.6	Antecedentes	5
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>Marco Teórico</b>	<b>11</b>
2.1	Aceros al carbono	11
2.1.1	<i>Definición</i>	11
2.1.2	<i>Clasificación de los aceros</i>	11
2.1.3	<i>Material en Estudio (ASTM A 178)</i>	14
2.1.3.1	Composición química del acero ASTM A178	14
2.1.3.2	Propiedades mecánicas del acero ASTM A178	14

2.1.3.3 Aplicaciones	15
2.2 Manufactura	15
2.2.1 Definición	15
2.2.2 Procesos de manufactura	16
2.3 Procesos de Soldadura	18
2.3.1 Definición	18
2.3.2 Clasificación general de los tipos de soldadura	18
2.3.3 Soldadura por arco eléctrico	20
2.3.3.1 Soldadura por arco en atmosfera inerte	20
2.4 Procesos de Soldadura TIG	22
2.4.1 Introducción Histórica	22
2.4.2 Descripción Preliminar	22
2.4.3 Equipo Básico para TIG ó GTAW	24
2.4.4 Ventajas, limitaciones y problemas potenciales para TIG o GTAW	30
2.5 Corrosión	31
2.5.1 Descripción preliminar	31
2.5.2 Mecanismos Electroquímicos de la Corrosión	34
2.5.3 Definición de Ánodo y Cátodo	35
2.5.4 Termodinámica de la Corrosión Acuosa	37
2.5.5 Efecto del Oxígeno Disuelto	39
2.5.6 Efecto de la Temperatura	40
2.5.7 Efecto del ph	40
2.5.8 Clasificación de la Corrosión	41
2.5.8.1 Corrosión Uniforme (Generalizada)	41
2.5.8.2 Corrosión Galvánica	42
2.5.8.3 Corrosión por Grietas	42
2.5.8.4 Corrosión por Picaduras	43
2.5.8.5 Corrosión Intergranular	43
2.5.8.6 Corrosión por Erosión	43
2.5.8.7 Corrosión por Tensión	43
2.5.8.8 Corrosión Salina Neutra	44
2.5.8.9 Corrosión Salina Ácida	44
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>45</b>
<b>Metodología</b>	
3.1 Nivel de la Investigación	45
3.2 Diseño de la Investigación	46
3.3 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	46
3.4 Técnicas de Procesamiento de Datos	46
3.5 Adquisición del material de estudio	47
3.6 Elaboración de las probetas	47
3.6.1 Diseño y realización del corte del material de Estudio	47
3.6.1.1 Material de probetas para tracción	47
3.6.1.2 Material de probetas para ensayos de	48

	dureza y metalografía	
3.6.2	<i>Proceso de elaboración de las juntas soldadas</i>	49
3.6.2.1	<i>Equipos utilizados</i>	50
3.6.2.2	<i>Materiales utilizados</i>	51
3.6.2.3	<i>Parámetros de las soldaduras</i>	52
3.6.3	<i>Elaboración de las probetas de tracción</i>	56
3.6.4	<i>Elaboración de las probetas de dureza y metalografía</i>	58
3.7	<b>Procedimientos Experimentales</b>	59
3.7.1	<i>Ensayo de Corrosión</i>	59
3.7.1.1	<i>Preparación Superficial de la Muestra</i>	60
3.7.1.2	<i>Mediciones y Pesaje de la Muestra</i>	61
3.7.1.3	<i>Preparación de la Solución Salina</i>	61
3.7.1.4	<i>Períodos de Exposición</i>	61
3.7.1.5	<i>Evaluación de la corrosión</i>	62
3.7.2	<i>Ensayo de Tracción</i>	62
3.7.2.1	<i>Equipos utilizados</i>	63
3.7.2.2	<i>Procedimientos del ensayo</i>	63
3.7.3	<i>Ensayo de Metalografía</i>	66
3.7.3.1	<i>Equipos y materiales utilizados</i>	66
3.7.3.2	<i>Procedimientos del ensayo</i>	68
3.7.4	<i>Ensayo de Microdureza</i>	69
3.7.4.1	<i>Equipos utilizados</i>	70
3.7.4.2	<i>Procedimientos del ensayo</i>	70
3.7.5	<i>Análisis de los Datos Obtenidos</i>	71
<b>CAPÍTULO 4</b>	<b>Resultado y Análisis de Resultados</b>	<b>73</b>
4.1	<i>Caracterización del metal base</i>	73
4.1.1	<i>Ensayos de tracción</i>	73
4.1.2	<i>Ensayos de dureza</i>	77
4.1.3	<i>Ensayos de metalografía</i>	78
4.2	<i>Caracterización del material soldado</i>	80
4.2.1	<i>Ensayos de tracción</i>	80
4.2.1.1	<i>Probetas soldadas con intensidad de corriente baja</i>	81
4.2.1.2	<i>Probetas soldadas con intensidad de corriente media</i>	82
4.2.1.3	<i>Probetas soldadas con intensidad de corriente alta</i>	83
4.2.1.4	<i>Análisis de los ensayos de tracción</i>	84
4.2.2	<i>Ensayos de dureza</i>	85
4.2.3	<i>Ensayos de metalografía</i>	90
4.3	<i>Ensayos de corrosión</i>	92
4.3.1	<i>Pérdida de peso en las probetas de tracción</i>	94
4.4	<i>Ensayos de tracción</i>	96

4.4.1	<i>Probetas soldadas con intensidad de corriente baja</i>	96
4.4.1.1	<i>Período de exposición de dos días</i>	96
4.4.1.2	<i>Período de exposición de cuatro días</i>	97
4.4.1.3	<i>Período de exposición de siete días</i>	98
4.4.1.4	Análisis de los ensayos de tracción	99
4.4.2	<i>Probetas soldadas con intensidad de corriente media</i>	99
4.4.2.1	<i>Período de exposición de dos días</i>	99
4.4.2.2	<i>Período de exposición de cuatro días</i>	101
4.4.2.3	<i>Período de exposición de siete días</i>	102
4.4.2.4	Análisis de los ensayos de tracción	104
4.4.3	<i>Probetas soldadas con intensidad de corriente alta</i>	106
4.4.3.1	<i>Período de exposición de dos días</i>	106
4.4.3.2	<i>Período de exposición de cuatro días</i>	107
4.4.3.3	<i>Período de exposición de siete días</i>	108
4.4.3.4	Análisis de los ensayos de tracción	109
4.5	Ensayos de dureza	110
4.5.1	<i>Muestras soldadas con intensidad de corriente baja</i>	110
4.5.1.1	<i>Período de exposición de dos días</i>	110
4.5.1.2	<i>Período de exposición de cuatro días</i>	112
4.5.1.3	<i>Período de exposición de siete días</i>	114
4.5.1.4	Análisis de los ensayos de dureza	116
4.5.2	<i>Muestras soldadas con intensidad de corriente media</i>	117
4.5.2.1	<i>Período de exposición de dos días</i>	117
4.5.2.2	<i>Período de exposición de cuatro días</i>	119
4.5.2.3	<i>Período de exposición de siete días</i>	120
4.5.2.4	Análisis de los ensayos de dureza	122
4.5.3	<i>Muestras soldadas con intensidad de corriente alta</i>	124
4.5.3.1	<i>Período de exposición de dos días</i>	124
4.5.3.2	<i>Período de exposición de cuatro días</i>	125
4.5.3.3	<i>Período de exposición de siete días</i>	126
4.5.3.4	Análisis de los ensayos de dureza	127
4.6	Ensayos de metalografía	128
4.7	Ensayos de Macroscopía	133
<b>CAPÍTULO 5</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>135</b>
5.1	Conclusiones	135
5.1	Recomendaciones	137
<b>Referencias Bibliográficas</b>		<b>139</b>

# Índice de tablas

<b>TABLAS</b>	<b>Pág</b>
2.1. Composición química del material en estudio.	14
2.2. Propiedades mecánicas del material en estudio.	14
2.3. Gas inerte para TIG o GTAW.	23
2.4. Características de corriente para soldadura TIG de diversos Metales.	27
2.5. Códigos de electrodos para TIG según AWS.	28
2.6. Parámetros aproximados para la soldadura TIG en aceros al carbono y de baja aleación, para posición plana en juntas a tope, juntas solapadas y filetes horizontales.	29
3.1. Características de la máquina de soldar utilizada.	50
3.2. Valores de corriente para cada sector con intensidad de corriente baja.	54
3.3. Valores de corriente para cada sector con intensidad de corriente media.	54
3.4. Valores de corriente para cada sector con intensidad de corriente alta.	54
3.5. Parámetros de la soldadura.	55
3.6. Características de la Cámara de niebla salina estándar.	60
4.1. Propiedades mecánicas del primer tubo.	75
4.2. Propiedades mecánicas del resto de los tubos.	75
4.3. Valores promedio de las propiedades mecánicas del material.	76
4.4. Pruebas de dureza de los tubos.	77
4.5. Propiedades mecánicas de las probetas soldadas con intensidad de corriente baja.	82
4.6. Propiedades mecánicas de las probetas soldadas con intensidad de corriente media.	83
4.7. Propiedades mecánicas de las probetas soldadas con intensidad	84

de corriente alta.	
4.8. Resultados de pruebas de dureza para muestras soldadas con intensidad de corriente baja.	86
4.9. Resultados de pruebas de dureza para muestras soldadas con intensidad de corriente media.	87
4.10. Resultados de pruebas de dureza para muestras soldadas con intensidad de corriente alta.	88
4.11. Pérdida de peso en las probetas de tracción.	95
4.12. Propiedades mecánicas de las probetas de tracción soldadas con intensidad de corriente baja sometidas a corrosión durante dos días.	97
4.13. Propiedades mecánicas de las probetas de tracción soldadas con intensidad de corriente baja sometidas a corrosión durante cuatro días.	98
4.14. Propiedades mecánicas de las probetas de tracción soldadas con intensidad de corriente baja sometidas a corrosión durante siete días.	99
4.15. Propiedades mecánicas de las probetas de tracción soldadas con intensidad de corriente media sometidas a corrosión durante dos días.	101
4.16. Propiedades mecánicas de las probetas de tracción soldadas con intensidad de corriente media sometidas a corrosión durante cuatro días.	102
4.17. Propiedades mecánicas de las probetas de tracción soldadas con intensidad de corriente media sometidas a corrosión durante siete días.	103
4.18. Propiedades mecánicas de las probetas de tracción soldadas con intensidad de corriente alta sometidas a corrosión durante dos días.	107
4.19. Propiedades mecánicas de las probetas de tracción soldadas con intensidad de corriente alta sometidas a corrosión durante cuatro días.	108
4.20. Propiedades mecánicas de las probetas de tracción soldadas con intensidad de corriente alta sometidas a corrosión durante siete días.	109
4.21. Resultados de pruebas de dureza para muestras soldadas con intensidad de corriente baja sometidas a corrosión durante dos días.	111
4.22. Resultados de pruebas de dureza para muestras soldadas con intensidad de corriente baja sometidas a corrosión durante cuatro días.	112
4.23. Resultados de pruebas de dureza para muestras soldadas con intensidad de corriente baja sometidas a corrosión durante siete días.	114
4.24. Resultados de pruebas de dureza para muestras soldadas con	117

intensidad de corriente media sometidas a corrosión durante dos días.	
4.25. Resultados de pruebas de dureza para muestras soldadas con intensidad de corriente media sometidas a corrosión durante cuatro días.	119
4.26. Resultados de pruebas de dureza para muestras soldadas con intensidad de corriente media sometidas a corrosión durante siete días.	121
4.27. Resultados de pruebas de dureza para muestras soldadas con intensidad de corriente alta sometidas a corrosión durante dos días.	124
4.28. Resultados de pruebas de dureza para muestras soldadas con intensidad de corriente alta sometidas a corrosión durante cuatro días.	125
4.29. Resultados de pruebas de dureza para muestras soldadas con intensidad de corriente alta sometidas a corrosión durante siete días.	126

# *Introducción*

---

Los aceros ASTM A 178 son los más utilizados en la industria de la fabricación de calderas, intercambiadores de calor, entre otros; debido a su calidad y bajo costo comparado con otros aceros. Este material está diseñado para soportar altas temperaturas, lo cual lo hace ideal para la fabricación de los equipos mencionados. Debido a su aplicación es sometido constantemente a la corrosión o a la presencia de medios corrosivos, los cuales debilitan al material, logrando así numerosas fallas en el equipo que se haya fabricado con este acero.

La corrosión se define como el deterioro de un material como resultado del ataque químico de su entorno. Ésta se refiere específicamente a cualquier proceso que involucre el deterioro o degradación de componentes del metal. Siempre que la corrosión esté originada por una reacción química la velocidad a la que tiene lugar dependerá en alguna medida de la temperatura, la composición del fluido corrosivo y las propiedades de los metales en cuestión.

Actualmente en la industria se lleva una gran lucha contra el fenómeno de la corrosión ya que el mismo es inevitable por formarse debido a las condiciones de trabajo, aunque éstas se puedan reducir siempre van originar deterioro en alguna medida, es la ley natural. Desde hace muchos años se esta estudiando la manera de reducir los daños ocasionados por el fenómeno de corrosión; se han creado pinturas anticorrosivas, procesos de

recubrimiento anticorrosivos, y un sin número de investigaciones sobre las causas de este fenómeno y la manera de cómo reducirlo.

Con esta investigación se busca ampliar el estudio acerca del efecto del fenómeno de corrosión sobre el proceso de soldadura TIG (o GTAW) realizado bajo tres valores de intensidad de corriente sometidos en un medio de solución salina al 5% de sodio durante tres diferentes períodos de exposición. El objeto es evaluar la corrosión producida en aceros ASTM A 178 en procesos de soldadura TIG mediante la variación de las propiedades mecánicas antes y después de la exposición al medio corrosivo.

El presente trabajo está constituido por cinco capítulos en donde se le da un orden progresivo al estudio de este tema.

En el primer capítulo se planteará la situación problemática, así como también el objetivo general y los específicos de dicho trabajo con los cuales se establecerá la dirección que tomará el mismo. Además se mostrarán el alcance, limitaciones y justificaciones que sustentan el estudio.

El segundo capítulo abarcará todas las teorías necesarias para proveer de conocimientos sobre el tema con lo que se podrán alcanzar los objetivos planteados y los mejores resultados. Aquí se explicarán los tipos de aceros al carbono (específicamente los de bajo contenido de carbono), sus aplicaciones, los procesos de manufactura en general, los procesos de soldadura por arco eléctrico haciendo énfasis en el proceso de electrodo de tungsteno y gas inerte protector (TIG), así como también los tipos de corrosión y su relación con las juntas soldadas.

El tercer capítulo, presentará la metodología empleada para desarrollar la investigación, donde se describe paso a paso el patrón que debe ser seguido desde el inicio hasta el final de la misma para cumplir cada objetivo específico.

En el cuarto capítulo se expondrán los resultados obtenidos de los ensayos y estudios necesarios para cumplir con los objetivos de este trabajo así como también los análisis de tales ensayos y estudios. Además se establecerán las comparaciones necesarias entre los resultados obtenidos para lograr establecer (mediante el análisis causa-efecto) de manera adecuada las conclusiones y recomendaciones.

Finalmente, en el quinto capítulo se expondrán las conclusiones y recomendaciones que se puedan establecer, sustentadas en los resultados experimentales y sus respectivos análisis.

# CAPÍTULO 1

## *El Problema*

---

---

### **1.1. Situación Problemática.**

En la industria es frecuente el uso de dispositivos que trabajan en contacto directo con fluidos. Tales equipos pueden ser máquinas propiamente dichas (motores, bombas, turbinas) o elementos diseñados para intercambiar energía con el ambiente. Estos pueden ser: intercambiadores de calor, torres de enfriamiento, calderas, recuperadores, entre otros.

Las calderas, al igual que los intercambiadores de calor, son dispositivos diseñados para generar vapor sobrecalentado, este vapor se genera a través de una transferencia de calor en la cual el fluido, originalmente en estado líquido, se calienta y cambia de estado. Estos equipos son recipientes a presión, construidos en partes de acero laminado. El fluido de trabajo de las calderas se mueve por tuberías que pueden ser unidas mediante bridas con pernos y tuercas, o por soldadura, siendo este último el más común para esta aplicación. La soldadura es un método de fijación en el que las piezas a unir se funden agregando o no un material de aporte, de manera que al enfriarse se solidifique en una unión permanente.

Existen muchos métodos de soldadura tales como la soldadura por fricción, por arco eléctrico, con gases de protección, entre otras, sin embargo

uno de los procesos más conocidos es el TIG (“tungsten inert gas”) el cual utiliza un electrodo de tungsteno y una protección gaseosa (normalmente argón, helio o una mezcla de ellos). La soldadura representa un punto débil en la tubería, ya que al fundir el material base éste cambia sus propiedades mecánicas. Esto ocasiona fallas, bien sea por esfuerzos excesivos, corrosión, fatiga, entre otros.

La corrosión es una reacción química (oxidorreducción) en la que intervienen dos factores: la pieza manufacturada y el ambiente. La corrosión es definida como el deterioro de un material a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno, la velocidad a la que tiene lugar este fenómeno dependerá en alguna medida de la temperatura, la salinidad del fluido en contacto con el metal y las propiedades de los metales en cuestión.

El fenómeno de corrosión afecta a todos los materiales y en todos los ambientes, por tanto es fácil pensar que representa un grave problema para los dispositivos que trabajen con fluidos; a saber, bombas, tuberías, recipientes a presión, turbinas, intercambiadores de calor, calderas, entre otros.



**Figura 1.1. Tubería de caldera corroída.**

Fuente: Causa de fallas en calderas. Pacheco, Chávez y Paredes (2003), Edición Especial ESPOLCiencia Revista Tecnológica.

Este inconveniente es la principal causa de numerosas paradas dentro de las empresas cuyo proceso requiere del uso de calderas. La acumulación

de incrustaciones en las tuberías de alimentación del fluido de trabajo, junto con la corrosión originada por éste, ocasiona que eventualmente la tubería falle por corrosión.

Un punto clave donde ocurren estas fallas es en las uniones soldadas, debido a que ahí se presentan discontinuidades en la forma de la tubería, y distinta rugosidad, por lo que es allí donde se acumulan mayormente las incrustaciones. De continuar estas fallas en las calderas se seguirán generando pérdidas en las industrias del país, por lo que se debe prestar atención a este problema para reducir el impacto dentro de las empresas que sean afectadas.

De poder existir un estudio donde se explique el efecto que tiene el fenómeno de corrosión sobre las tuberías sería posible poder obtener un criterio de diseño que disminuya este efecto.

## **1.2. Objetivos.**

### **1.3.1. Objetivo General.**

Estudiar la corrosión producida en aceros ASTM A 178 en procesos de soldadura TIG.

### **1.3.2. Objetivos Específicos.**

- Determinar las propiedades mecánicas en el material ASTM A 178
- Determinar la resistencia a la corrosión del material bajo este proceso de soldadura.
- Determinar el grado de corrosión en el material ASTM A 178.
- Estudiar la microestructura del material corroído y sin corroer.
- Determinar las propiedades mecánicas del material expuesto a la corrosión y no expuesto a la corrosión.

- Establecer parámetros de diseño.

### **1.3. Justificación.**

Uno de los grandes problemas que originan el deterioro prematuro de las máquinas en general es la corrosión, debido al contacto constante con su ambiente, con fluidos involucrados en el proceso, entre otros. La corrosión es inevitable, pero se puede reducir en gran cantidad. La corrosión ocurre con frecuencia en uniones soldadas, ya que éstas representan discontinuidades en las tuberías, es en dichos puntos donde puede presentarse corrosión localizada.

Por esta razón es que ampliar el estudio sobre la influencia de este fenómeno es tan importante ya que beneficiaría tanto a las empresas como a la investigación de la Universidad de Carabobo, aportando material de referencia para realizar diseños en un futuro.

En el mismo orden de ideas, se pretende ayudar a rehabilitar el banco de ensayos de corrosión del Laboratorio de Materiales (Escuela de Mecánica) de la Universidad de Carabobo, con el objetivo de utilizarla en nuestro estudio y que continúe operativa para futuras investigaciones.

### **1.4. Alcance.**

La investigación se realizará con una (1) concentración de sal, a la que se expondrán las probetas durante tres (3) diferentes períodos de tiempo.

Los tiempos de exposición de las probetas no excederán en ningún caso el período requerido para la realización de los ensayos normalizados de corrosión.

Se realizarán ensayos de tracción, dureza y metalografía antes y después de la exposición a la corrosión, con la finalidad de verificar la influencia de la misma en la soldadura.

### **1.5. Limitaciones.**

Disposición de la concentración salina con la cual se realizarán los ensayos de corrosión.

Disponibilidad de las máquinas para la realización de los ensayos de corrosión y los ensayos de comprobación de las propiedades del material.

Disponibilidad de máquinas para la realización de la soldadura TIG.

Disponibilidad del material en forma de lámina, tubos, etc.

Adquisición de electrodos de tungsteno.

### **1.6. Antecedentes.**

M. Vogt se ha ocupado mucho, en el periódico técnico acreditado STAHT AND EISEN, de la manera de apreciar generalmente la calidad de las aguas de alimentación de las calderas, para censurarlas. En su juicio, el gran error que se comete es el ocuparse solamente de la pureza del agua, mientras que importa mucho el asegurarse igualmente de las demás sustancias que entran en la composición de aquella, teniendo en cuenta que es la influencia de algunas de estas las que hacen el mayor daño en las reparaciones que necesitan las calderas, y aun de las causas mismas de las explosiones. La cuestión es tanto más importante, por cuanto lo que se hace para evitar la corrosión puede en definitiva ser la causa de producirla. En la mayor parte de los casos en que se purifica el agua para liberarse de las sustancias que se temen formen incrustaciones, estos es, los sulfatos o los bicarbonatos, se emplea la soda o el agua de cal, dando lugar a que los sulfatos de sodio en disolución se introduzcan después en las calderas por las aguas purificadas, y cuando el agua en que se encuentran se vaporice, permanecerán sin disolver en el agua hirviendo. (Vogt, 1905).

Los tubos de calderas son expuestos a oxidación por altas temperaturas y corrosión caliente, lo cual se sabe es una de las mayores causas del deterioro de éstos. La corrosión es un problema serio en calderas que utilizan fluidos de trabajo muy alcalinos (sodio, potasio), clorados y sulfurados. Existen varias opciones para prevenir los problemas de corrosión por alta temperatura: modificar el diseño de la caldera para minimizar la deposición de ceniza en los tubos aleados, controlar el ambiente de operación para mitigar la corrosividad, innovar en los materiales de los tubos para vencer el daño corrosivo. (Rezakhani, 2007).

Para que aparezca la corrosión, es necesario que exista presencia de agua en forma líquida, el vapor seco con presencia de oxígeno, no es corrosivo, pero los condensados formados en un sistema de esta naturaleza son muy corrosivos. En las líneas de vapor y condensado, se produce el ataque corrosivo más intenso en las zonas donde se acumula agua condensada. La corrosión que produce el oxígeno, suele ser severa, debido a la entrada de aire al sistema, a bajo valor de pH, el bióxido de carbono abarca por si mismo los metales del sistema y acelera la velocidad de la corrosión del oxígeno disuelto cuando se encuentra presente en el oxígeno. El oxígeno disuelto ataca las tuberías de acero al carbono formando montículos o tubérculos, bajo los cuales se encuentra una cavidad o celda de corrosión activa: esto suele tener una coloración negra, formada por un óxido ferroso-férrico hidratado.

La formación de incrustaciones en el interior de las calderas suelen verse con mayor frecuencia que lo estimado conveniente. El origen de las mismas está dado por las sales presentes en las aguas de aporte a los generadores de vapor, las incrustaciones formadas son inconvenientes debido a que poseen una conductividad térmica muy baja y se forman con mucha rapidez en los puntos de mayor transferencia de temperatura. Por esto, las calderas incrustadas requieren un mayor gradiente térmico entre el agua y la

pared metálica que las calderas con las paredes limpias. (Barrantes et al, 2006)

En muchos casos, se requiere unir dos tipos aceros diferentes mediante soldadura, tal es el caso de los reservorios de agua para la industria de la energía solar. El uso de dos diferentes tipos de aceros en contacto el uno con el otro puede conducir a la corrosión galvánica, y la soldadura de las piezas de acero puede ocasionar severos problemas de corrosión. El problema de la corrosión en la unión de los aceros inoxidable es de corrosión localizada, específicamente en el área e la soldadura. La unión de dos diferentes tipos de aceros inoxidable en la fabricación de reservorios de agua es un proceso necesario de la industria de energía solar. (Dantas et al, 2008)

En general, evitar la existencia de corrosivos concentrados es el medio con más éxito para reducir o eliminar el agrietamiento por corrosión bajo esfuerzo. Los primeros pasos son evitar la salida de ebullición nucleada, conservar las superficies internas suficientemente libres de depósitos y evitar la formación de líneas de nivel del vapor y líneas del nivel del agua en los componentes que reciben un elevado flujo de calor.

Otros pasos pueden incluir el de evitar la infiltración de sales productoras de alcalinidad; impedir la contaminación del agua para eliminar el sobrecalentamiento por materiales alcalinos o cloruros, y evitar el arrastre por parte del agua de la caldera.

El uso de inhibidores, como el nitrato de sodio ha tenido éxito en la reducción del agrietamiento cáustico por corrosión bajo esfuerzo. También puede resultar valioso un programa de fosfato coordinado, el cual está diseñado para eliminar la formación de hidróxido de sodio libre. (Pacheco et al, 2003)

En los aceros inoxidable se pueden presentar diferentes tipos de corrosión dependiendo del medio agresor y de las condiciones superficiales,

rugosidades, picaduras y esfuerzos residuales, los tipos de corrosión que se pueden presentar son: intergranular, por picadura, por esfuerzos, galvánica, etc. Teniendo en cuenta lo anterior se presenta el estudio del deterioro del acero inoxidable austenítico 304 unido por soldadura mediante procesos SMAW, GTAW Y GMAW expuesto en un medio industrial (Torres de Sulfatación de un ingenio azucarero) a gases de azufre.

De esta investigación se observó que el proceso de soldadura GMAW fue el más afectado por la corrosión intergranular, en las zonas segregadas, al interior del cordón, mientras que en los procesos SMAW y GTAW el avance de la corrosión no fue tan significativo. Probablemente la causa del fenómeno de corrosión presentado se debió a los niveles de segregación presentados en los cordones de la soldadura, lo cual generó según los resultados una mayor presencia de carbono en las zonas segregadas y adicionalmente se presenta un par galvánico entre la zona segregada y no segregada que co-ayuda al fenómeno de la corrosión. (Terán et al, 2004)

Desde un punto de vista práctico, es interesante conocer la resistencia a la corrosión de un determinado metal o aleación en un medio ambiente específico.

Sobre la base de ensayos en el laboratorio, se pueden llegar a establecer las condiciones ambientales más fielmente parecidas a la realidad y, por tanto, estudiar el comportamiento de un metal o varios metales en este medio. La realización de estos ensayos en el laboratorio puede ser fácil o extraordinariamente difícil, según la naturaleza del medio estudiado.

El método utilizado tradicionalmente para cuantificar la corrosión, es el de medida de la pérdida de peso. Como su nombre indica, este método consiste en determinar la pérdida de peso que ha experimentado un determinado metal o aleación en contacto con un medio corrosivo. Sin embargo, la corrosión localizada supone muy a menudo una pérdida mínima de material, pero en cambio puede alterar drásticamente sus propiedades

mecánicas. Por tanto, un control de esas propiedades mecánicas puede poner de manifiesto este tipo de ataque. Por ejemplo, un ensayo de tracción permitirá determinar la resistencia del metal atacado en comparación con una probeta del mismo material que no haya sido sometida a las condiciones del medio agresivo. (Ávila y Genescá, 1987)

# CAPÍTULO 2

## *Marco Teórico*

---

---

### **2.1. Aceros al Carbono.**

#### *2.1.1. Definición.*

Los aceros son aleaciones hierro-carbono, con contenido de carbono máximo de 2,11%C. generalmente se consideran aceros al carbono aquellos con un contenido máximo de carbono del 1,7%. La mayoría de los aceros contienen pequeñas cantidades de manganeso (hasta 0,9%) y de silicio (hasta 0,3%) y la función de estos elementos es actuar como desoxidantes, combinándose con el oxígeno y el azufre reduciendo los efectos perjudiciales de estos. [Castro, 2006]

#### *2.1.2. Clasificación de los aceros.*

Los aceros pueden ser clasificados por una variedad de diferentes sistemas que dependen de:

- La composición, propiamente de carbono, bajo-aleación, o aceros inoxidables.
- Los métodos industriales, como el horno de solera abierto, el proceso de oxígeno básico, o los métodos de los hornos eléctricos.

- El método de conformado, como laminado en caliente o el laminado en frío.
- La forma del producto, como barras, platos, chapas, tiras, tuberías, o forma estructural.
- La microestructura, como la ferrítica, perlítica, martensítica, entre otras.
- El nivel de fuerza requerido, como el especificado en las normas ASTM.
- El tratamiento de térmico, como templado, revenido, normalizado, entre otros.
- La Calidad del proveedor, como la calidad de la forja y la calidad comercial.

En la figura 2.1 se muestra el diagrama de la clasificación de los aceros donde se puede observar algunos de los sistemas de clasificación explicados anteriormente. [Metals HANDBOOK, Volumen 1]

El AISI (Instituto Americano De Hierro y Acero) y el SAE (Sociedad de Ingenieros Automotrices) tienen sistemas para clasificar aceros utilizan un número de cuatro o cinco dígitos. Los dos primeros números se refieren a los principales elementos de aleación presentes y los últimos dos o tres se refieren al porcentaje de carbono. Un acero AISI 1040 es al bajo carbono, 0,40%C. Un acero SAE 10120 es al bajo carbono, conteniendo 0,20%C. Un acero AISI 4340 es aleado y contiene 0,40%C. [Askeland, 1998]

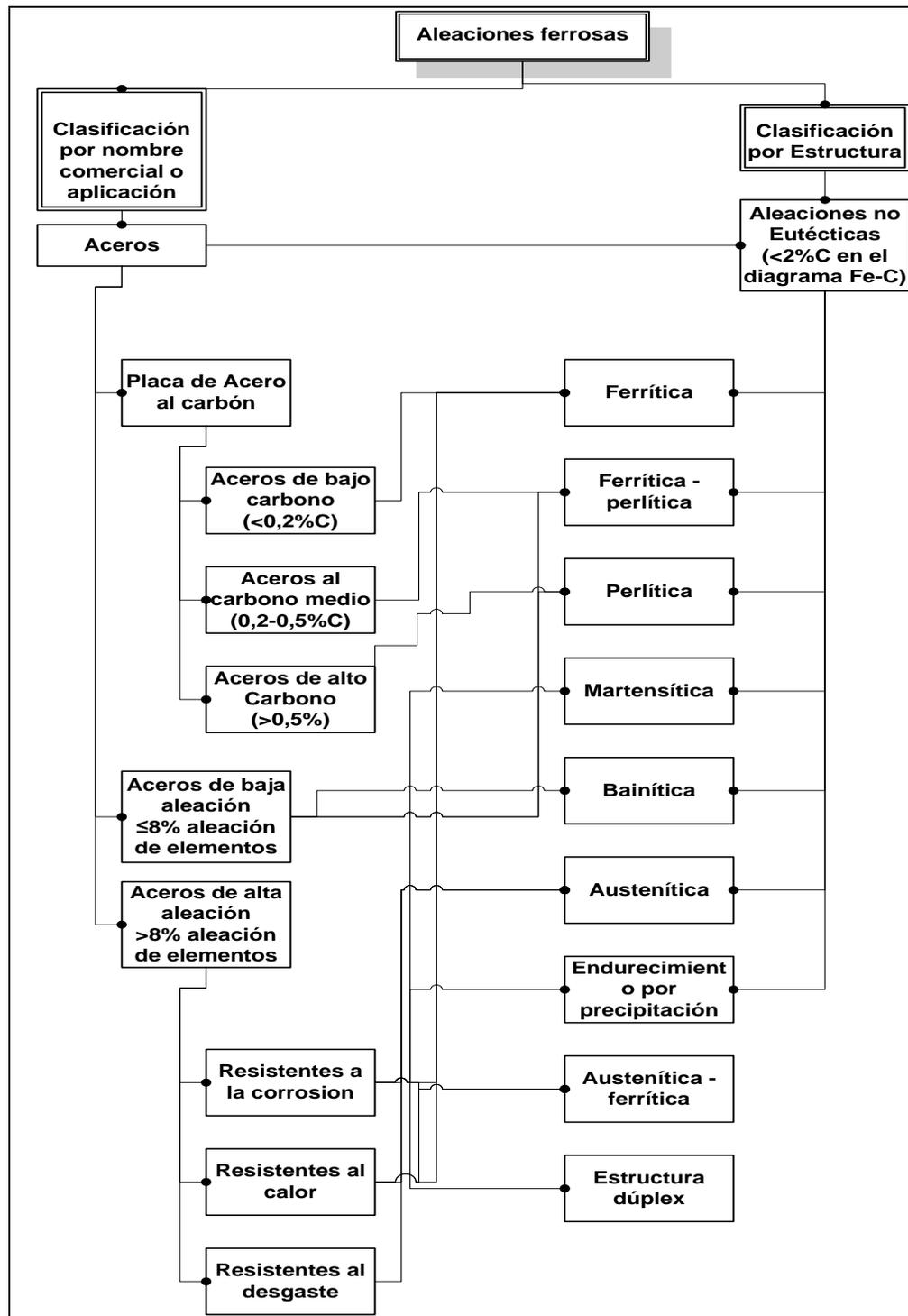


Figura 2.1. Clasificación de los aceros.

Fuente: D.M Stefanescu, University of Alabama, Tuscaloosa. ASM Metals HANDBOOK volume 1: Properties and Selection: Iron Steels and High performance alloys

### 2.1.3. Material en Estudio (ASTM A178).

#### 2.1.3.1. Composición química del acero ASTM A178.

Según la norma ASTM A 178/A 178M, la composición química que corresponde al acero A 178 se puede observar en la tabla 2.1.

**Tabla 2.1. Composición Química del Material en Estudio.**

ASTM A178 Grado A	Porcentaje (%)
<b>Carbón</b>	0,06 - 0,18
<b>Manganeso</b>	0,27 – 0,63
<b>Fósforo máximo</b>	0,035
<b>Azufre máximo</b>	0,035

Fuente: Standard specification for electric-resistance- welded carbon steel and carbon-manganese steel boiler and superheater tubes. Designation ASTM A 178/A 178M.

#### 2.1.3.2. Propiedades mecánicas del acero ASTM A178.

El acero A 178 cuenta con las siguientes propiedades mecánicas en función a la temperatura a la que es sometido. (Ver tabla 2.2)

**Tabla 2.2. Propiedades Físicas del Material en Estudio.**

Especificación	Tratamiento	Límite Elástico	Resistencia a la	Elongación %
ASTM	Térmico °C	MPa [Ksi]	Tracción MPa [Ksi]	En 50 mm
<b>A 178 A</b>	900° min	180* [26*]	325* [47*]	35*

\* Para efectos de diseño

Fuente: Standard specification for electric-resistance- welded carbon steel and carbon-manganese steel boiler and superheater tubes. Designation ASTM A 178/A 178M.

### 2.1.3.3. Aplicaciones.

Las principales aplicaciones para este acero son:

- Calderas pirotubulares; conducir los gases calientes procedentes de la combustión, los tubos se encuentran rodeados de agua a la cual se le va a elevar la temperatura para producir el calor.
- Conductos de humos para calderas; para transportar el humo producto de la combustión en calderas pirotubulares.
- Conductos de vapor; en los dispositivos térmicos donde se necesite transportar vapor, intercambiadores de calor, economizadores, guiar el vapor desde la caldera hasta el sitio de utilización.
- Extremos de seguridad; conexiones en las tuberías, codos, reducciones, bridas, entre otros.

En general se utilizan en aplicaciones donde se requiere transportar vapor de un sitio a otro mediante tuberías, a las cuales se les debe añadir accesorios mediante procesos de unión permanente, el más utilizados por excelencia es la soldadura por fusión (ASTM A178).

## **2.2. Manufactura.**

### *2.2.1. Definición.*

La palabra manufactura se deriva de las palabras latinas "*manus*" (manos) y "*factus*" (hacer); esta combinación de términos significa hacer las manos. La palabra inglesa "manufacturing" tiene ya varios siglos de antigüedad, y la expresión "hecho a mano" describe precisamente el método manual que se usaba cuando se acuñó la palabra. Gran parte de la moderna manufactura se realiza con maquinaria computarizada y automatizada que se supervisa manualmente.

La manufactura, como campo de estudio en el contexto moderno, puede definirse de dos maneras: tecnológica y económica. Tecnológicamente es la aplicación de procesos químicos y físicos que alteran la geometría, las propiedades, o el aspecto de un determinado material para elaborar partes o productos terminados. Los procesos para realizar la manufactura involucran una combinación de maquinas, herramientas, energía y trabajo manual. La manufactura se realiza siempre como una sucesión de operaciones. Cada una de ellas lleva al material cada vez más cerca del estado final deseado.

Económicamente, la manufactura es la transformación de materiales en artículos de mayor valor, a través de una o más operaciones o procesos de ensamble. El punto clave es que la manufactura agrega valor al material original, cambiando su forma o propiedades, o al combinarlo con otros materiales que han sido alterados en forma similar, el material original se vuelve más valioso mediante las operaciones de manufactura que se ejecutan sobre él. Cuando el mineral de hierro se convierte en acero, se le agrega valor. Lo mismo sucede cuando el petróleo se refina y convierte en plástico; cuando el plástico se moldea en una compleja geometría de una silla de patio, se hace aun más valioso. (Groover, 1997)

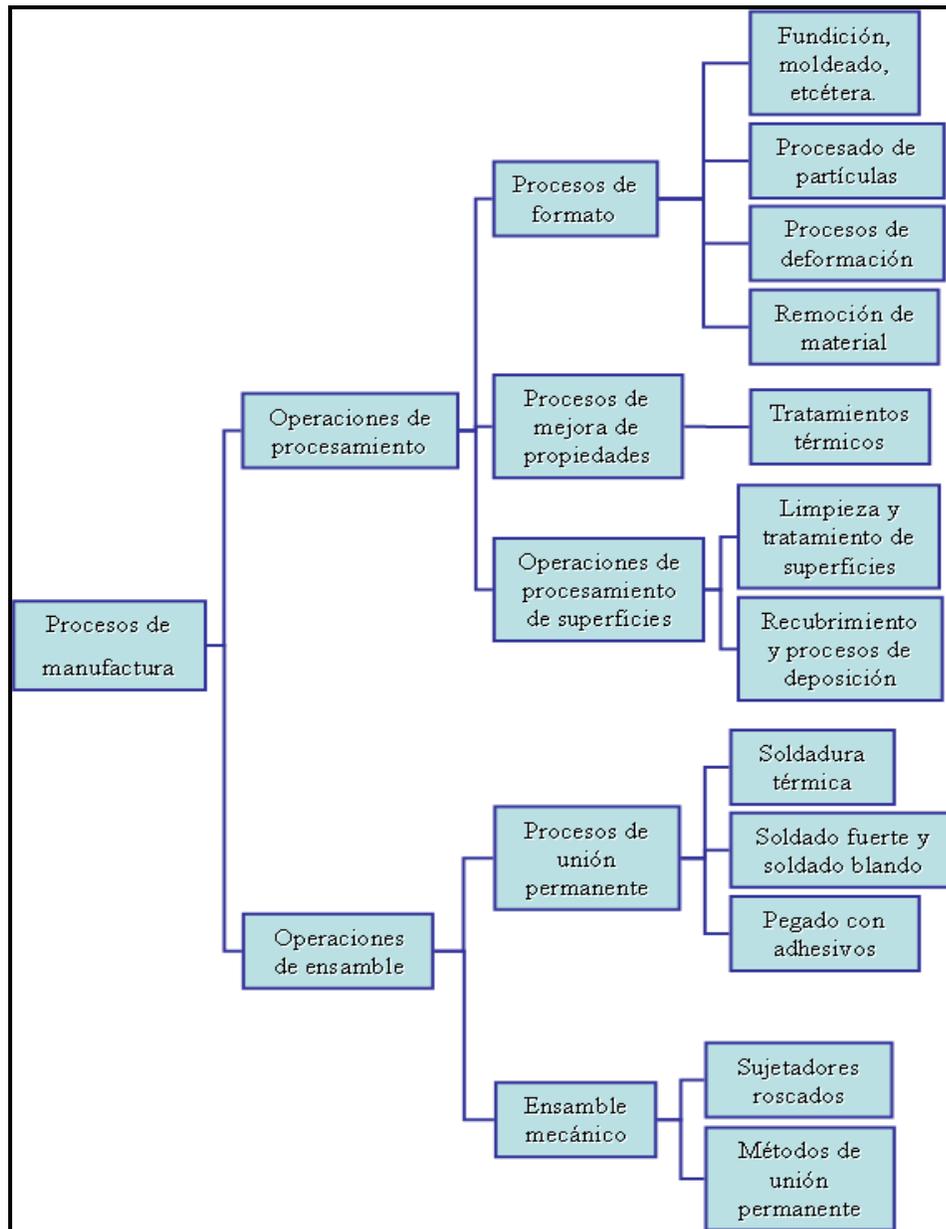
### *2.2.2. Procesos de manufactura.*

Los procesos de manufactura pueden dividirse en dos tipos básicos:

- 1) Operaciones de proceso.
- 2) Operaciones de ensamble.

Una operación de proceso transforma un material de trabajo de una etapa a otra más avanzada, que lo sitúa cerca del estado final deseado para el producto. Esto le agrega valor al cambiar la geometría, las propiedades o la apariencia del material inicial. Por lo general, las operaciones de proceso se ejecutan sobre partes discretas de trabajo, pero algunas de ellas se aplican también a artículos ensamblados. Una operación de ensamble une dos o más

componentes para crear una nueva entidad llamada ensamble, sub-ensamble o cualquier otra manera que se refiera al proceso de unir (por ejemplo a un ensamble soldado se le llama conjunto soldado). En la figura 2.2 se presenta una clasificación de procesos de manufactura. (Groover, 1997)



**Figura 2.2. Clasificación de procesos de manufactura.**

Fuente: Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas. Groover, (1997); Editorial Pearson Hill.

## **2.3. Procesos de Soldadura.**

### *2.3.1. Definición.*

La *soldadura* es un proceso de unión entre metales por la acción del calor, con o sin aportación de material metálico nuevo, dando continuidad a los elementos unidos.

Es necesario suministrar calor hasta que el material de aportación funda y una ambas superficies, o bien lo haga el propio metal de las piezas. Para que el metal de aportación pueda realizar correctamente la soldadura es necesario que cubra a los metales que se van a unir, lo cual se verificará siempre que las fuerzas de adherencia entre el metal de aportación y las piezas que se van a soldar sean mayores que las fuerzas de cohesión entre los átomos del material añadido. (Tecnología industrial, 2008)

### *2.3.2. Clasificación general de los Tipos de Soldadura.*

Se pueden distinguir primeramente los siguientes tipos de soldadura:

- Soldadura heterogénea. Se efectúa entre materiales de distinta naturaleza, con o sin metal de aportación: o entre metales iguales, pero con distinto metal de aportación. Puede ser blanda o fuerte.
- Soldadura homogénea. Los materiales que se sueldan y el metal de aportación, si lo hay, son de la misma naturaleza. Puede ser oxiacetilénica, eléctrica (por arco voltaico o por resistencia), entre otros. Si no hay metal de aportación, las soldaduras homogéneas se denominan autógenas.

Por soldadura autógena se entiende aquella que se realiza sin metal de aportación, de manera que se unen cuerpos de igual naturaleza por medio de la fusión de los mismos; así, al enfriarse, forman un todo único. En la figura 2.3 se puede observar el diagrama de clasificación de los diferentes tipos de soldadura.

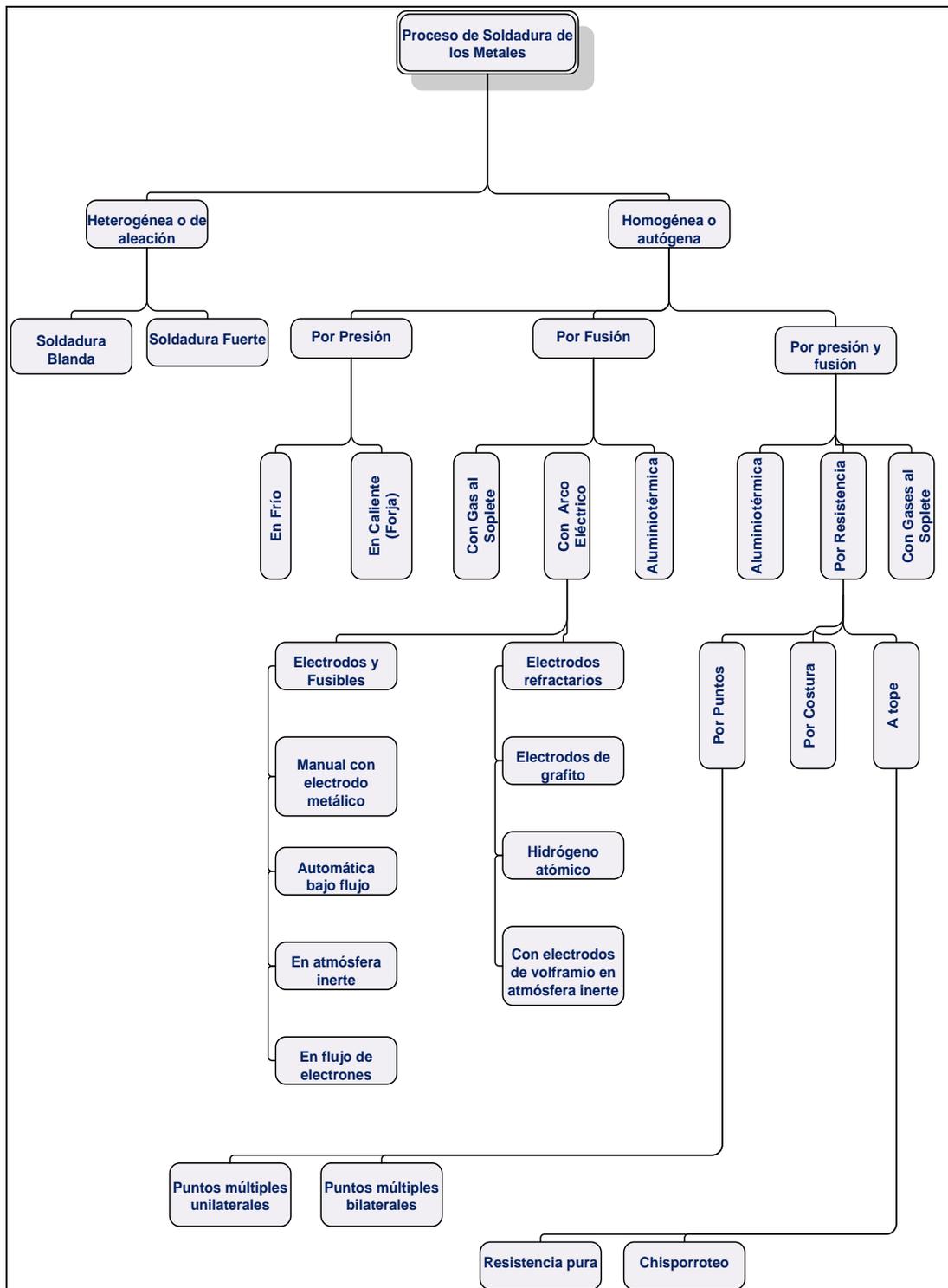
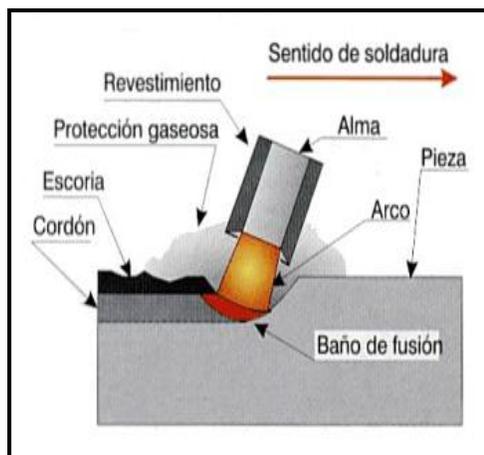


Figura 2.3. Diagrama de la clasificación de la soldadura.

Fuente: Procedimiento de unión: Soldadura. Tecnología industrial (2008). I.E.S. "Cristóbal de Monroy". Dpto. de Tecnología.

### 2.3.3. Soldadura por arco eléctrico.

En la actualidad, la soldadura eléctrica resulta indispensable para un gran número de industrias. Es un sistema de reducido coste, de fácil y rápida utilización, resultados perfectos y aplicables a toda clase de metales. Puede ser muy variado el proceso. El procedimiento de soldadura por arco consiste en provocar la fusión de los bordes que se desea soldar mediante el calor intenso desarrollado por un arco eléctrico (ver figura 2.4). Los bordes en fusión de las piezas y el material fundido que se separa del electrodo se mezclan íntimamente, formando, al enfriarse, una pieza única, resistente y homogénea. (Tecnología industrial, 2008)



**Figura 2.4. Soldadura por Arco Eléctrico.**

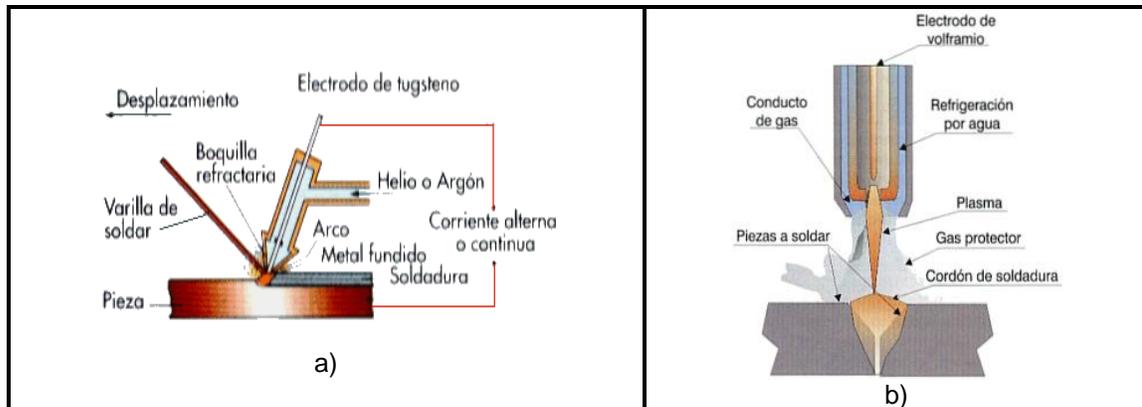
Fuente: Procedimiento de unión: Soldadura. Tecnología industrial. I.E.S. "Cristóbal de Monroy". Dpto. de Tecnología.

#### 2.3.3.1. Soldadura por arco en atmósfera inerte.

Este procedimiento se basa en aislar el arco y el metal fundido de la atmósfera, mediante un gas inerte; helio, argón, hidrógeno, anhídrido carbónico, entre otros. Existen varios procedimientos:

- Con electrodo refractario (método TIG): El arco salta entre el electrodo de Wolframio o tungsteno (que no se consume) y la pieza, el metal de

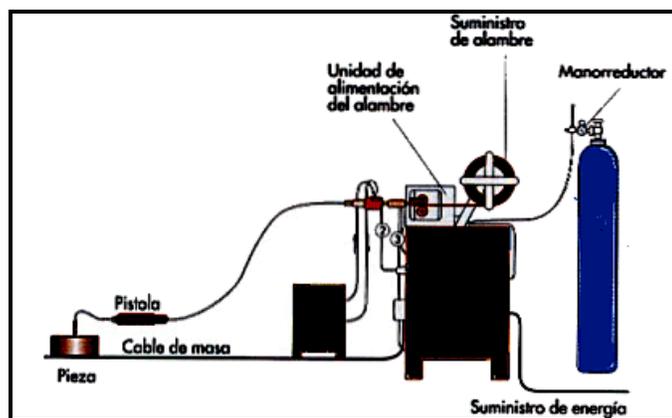
aportación es una varilla sin revestimiento de composición similar a la del metal base (ver figura 2.5).



**Figura 2.5. Soldadura Con electrodo refractario (método TIG).**

Fuente: Procedimiento de unión: Soldadura. Tecnología industrial. I.E.S. “Cristóbal de Monroy”. Dpto. de Tecnología.

- Con electrodo consumible (método **MIG** y **MAG**): Aquí se sustituye el electrodo refractario de wolframio por un hilo de alambre continuo y sin revestimiento que se hace llegar a la pistola junto con el gas (ver figura 2.6). Según sea el gas así recibe el nombre MIG (soldadura de metal con gas inerte) o MAG si utiliza anhídrido carbónico que es más económico. (Tecnología industrial, 2008)



**Figura 2.6. Soldadura Con electrodo consumible (método MIG y MAG).**

Fuente: Procedimiento de unión: Soldadura. Tecnología industrial. I.E.S. “Cristóbal de Monroy”. Dpto. de Tecnología.

## **2.4. Proceso de Soldadura TIG.**

### *2.4.1. Introducción Histórica.*

La soldadura de tungsteno protegida por gas inerte (TIG), o bien la denominación más moderna; soldadura de arco de tungsteno y gas protector (GTAW), data de mucho tiempo atrás. En el año 1900 se otorgó una patente relacionada con un sistema de electrodo rodeado por un gas inerte. Las experiencias con este tipo de soldadura continuaron durante las décadas de 1920 y 1930. Sin embargo, hasta 1940 no se produjo una gran evolución del proceso TIG o GTAW. Hasta antes que la 2a. Guerra Mundial comenzara, no se habían realizado muchos experimentos porque los gases inertes eran demasiado costosos. Ya una vez iniciada la Guerra, la industria aeronáutica necesitaba un método más sencillo y rápido para realizar la soldadura del aluminio y del magnesio, metales estos empleados en la fabricación de aviones. Por los incrementos en producción logrados con este sistema de soldadura, se justificó el incremento en costo por el empleo de este gas. Aunque la producción de este gas es ahora más económica y rápida, aún hoy representa un gasto adicional a considerar, pero ampliamente justificado por los resultados obtenidos.

### *2.4.2. Descripción Preliminar.*

El proceso GTAW, TIG es por fusión, en el cual se genera calor al establecerse un arco eléctrico entre un electrodo de tungsteno no consumible y el metal de base o pieza a soldar. Como en este proceso el electrodo no aporta metal ni se consume, de ser necesario realizar aportes metálicos se harán desde una varilla o alambre a la zona de soldadura utilizando la misma técnica que en la soldadura oxiacetilénica. La zona de soldadura estará protegida por un gas inerte, evitando la formación de escoria o el uso de fundentes o “flux” protectores. El *Helio* fue el primer gas inerte utilizado en estos procesos. Su función era crear una protección sobre el metal fundido y así evitar el efecto contaminante de la atmósfera (*Oxígeno* y *Nitrógeno*). La

característica de un gas inerte desde el punto de vista químico es que no reacciona en el proceso de soldadura. De los cinco gases inertes existentes (*Helio, Argón, Neón, Kriptón y Xenón*), solo resultan aptos para ser utilizados en esta aplicación el *Argón* y el *Helio*. Para una misma longitud de arco y corriente, el *Helio* necesita un voltaje superior que el *Argón* para producir el arco. El *Helio* produce mayor temperatura que el *Argón*, por lo que resulta más efectivo en la soldadura de materiales de gran espesor, en particular metales como el cobre, el aluminio y sus aleaciones. El *Argón* se adapta mejor a la soldadura de metales de menor conductividad térmica y de poco espesor, en particular para posiciones de soldadura distintas a la *plana*. En la Tabla 2.3 se describen los gases apropiados para cada tipo de material a soldar.

**Tabla 2.3. Gases inertes para TIG o GTAW.**

<b>Metal a soldar</b>	<b>Gas</b>
<b>Aluminio y sus aleaciones</b>	Argón
<b>Latón y sus aleaciones</b>	Helio o Argón
<b>Cobre y sus aleaciones(menor de 3mm)</b>	Argón
<b>Cobre y sus aleaciones(mayor de 3mm)</b>	Helio
<b>Acero al carbono</b>	Argón
<b>Acero Inoxidable</b>	Argón

Fuente: Manual de soldadura, Soldadura Eléctrica, MIG y TIG, Rodríguez, 2001. 1era edición, Librería y Editorial ALSINA.

Cuanto más denso sea el gas, mejor será su resultado en las aplicaciones de soldadura con arco protegido por gas. El *Argón* es aproximadamente 10 veces más denso que el *Helio*, cuando el *Argón* se descarga sobre la soldadura, este forma una densa nube protectora, mientras que la acción del *Helio* es mucho más liviana y vaporosa, dispersándose rápidamente.

En la actualidad y desde hace bastante tiempo, el Helio ha sido reemplazado por el Argón, o por mezclas de Argón-Hidrógeno o Argón-Helio. Ellos ayudan a mejorar la generación del arco eléctrico y las características de transferencia de metal durante la soldadura; favorecen la penetración, incrementan la temperatura producida, el ancho de la fusión, la velocidad de formación de soldadura reduciendo la tendencia al socavado.

#### *2.4.3. Equipo Básico para TIG ó GTAW.*

El equipamiento básico necesario para ejecutar este tipo de soldadura está conformado por:

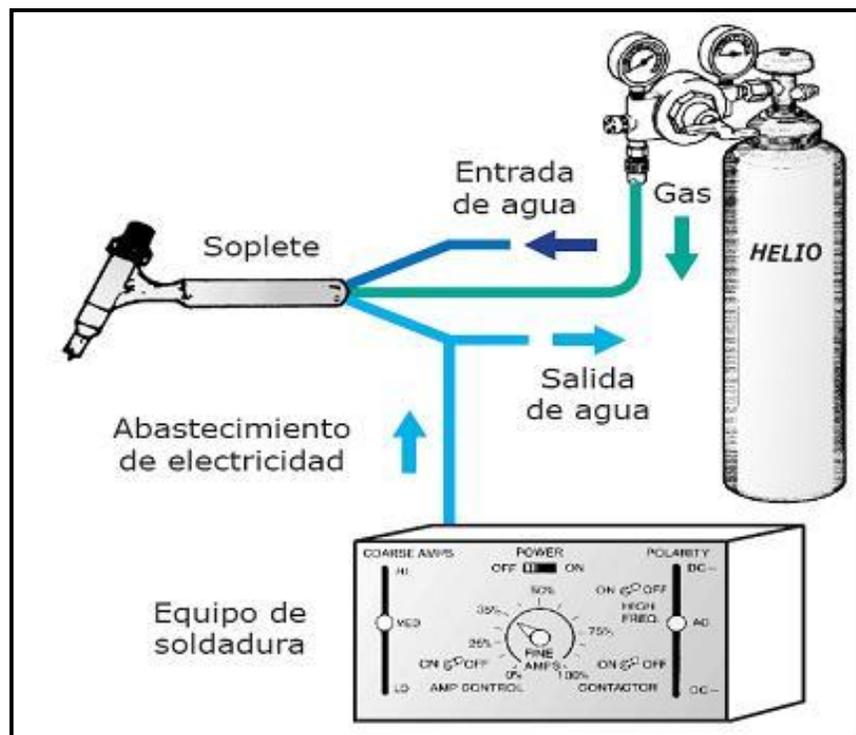
- Un equipo para soldadura por arco con sus respectivos cables.
- Provisión de un gas inerte, mediante un sistema de mangueras y reguladores de presión.
- Provisión de agua (solo para algunos tipos de sopletes).
- Soplete para soldadura TIG. Puede poseer un interruptor de control desde el cual se comanda el suministro de gas inerte, el de agua y el de energía eléctrica.

En la figura 2.7, se observa un esquema de un equipo básico de GTAW, en el cual se ilustra la alimentación y salida de suministro de agua. Este esquema, en algunos casos, puede darse sin el suministro de agua correspondiente. El mismo es utilizado como método de refrigeración.

Para soldar con GTAW (TIG), la corriente o su polaridad se determinan en función del metal a soldar.

Es posible utilizar CA o CC, inversa o directa respectivamente. Los equipos para soldar con GTAW poseen características particulares. Los equipos para soldadura GTAW poseen:

- Una unidad generadora de alta frecuencia (oscilador de alta frecuencia) que hace que se forme el arco entre el electrodo al metal a soldar. Con este sistema, no es necesario tocar la pieza con el electrodo.
- El equipo posee un sistema de electroválvulas de control, las cuales le permite controlar el accionamiento en forma conjunta del agua y el gas.
- Sólo algunos equipos poseen un control mediante pedal o gatillo en el soplete.

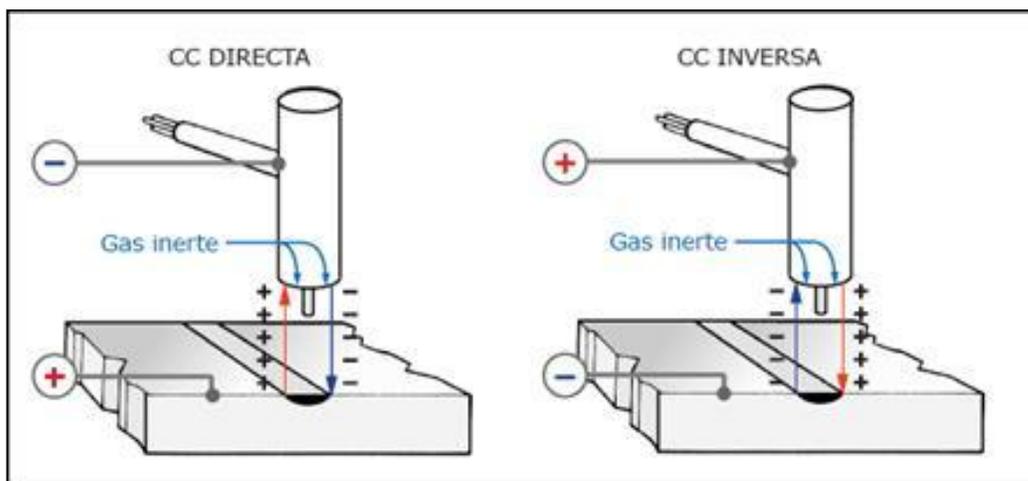


**Figura 2.7. Esquema de un sistema para soldadura de arco TIG.**

Fuente: Manual de soldadura, Soldadura Eléctrica, MIG y TIG, Rodríguez, 2001. 1era edición, Librería y Editorial ALSINA.

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

concentra en el electrodo de tungsteno. De lo antedicho se deduce que con el mismo valor de corriente (amperaje), pero cambiando la polarización a directa, se puede utilizar un electrodo de tungsteno de menor tamaño, favoreciendo ello a lograr un arco más estable y una mayor penetración en la soldadura efectuada. Sin embargo, la corriente continua directa no posee la capacidad de penetrar la capa de óxido que se forma habitualmente sobre algunos metales (Ej. aluminio). La corriente alterna (CA) tiene capacidad para penetrar la película de óxido superficialmente sobre algunos metales, pero el arco se extingue cada vez que la forma sinusoidal pasa por el valor cero de tensión o corriente, por lo que lo consideramos inadecuado (ver figura 2.8). Se encontró una solución a dicho problema superponiendo una corriente alterna de alta frecuencia (AF), la cual mantiene el arco encendido aún con tensión cero.



**Figura 2.8. Ilustración de las dos posibles polaridades.**

Fuente: Manual de soldadura, Soldadura Eléctrica, MIG y TIG, Rodríguez, 2001. 1era edición, Librería y Editorial ALSINA.

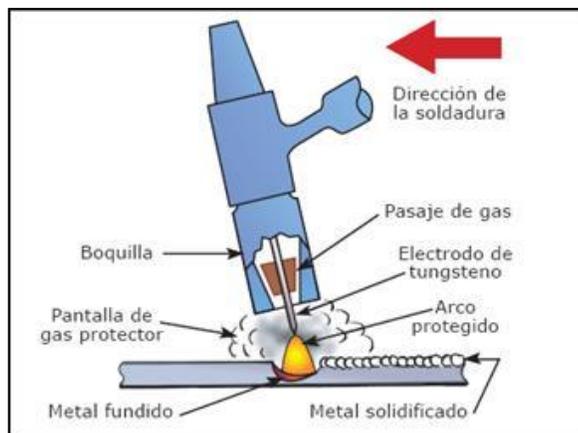
A continuación, en la Tabla 2.4, se detallan las características de corriente necesarias para la soldadura TIG de diversos metales, a saber:

**Tabla 2.4. Características de corriente para soldadura TIG de diversos metales.**

Metal a Soldar	Fuente de Potencia	
	Preferida	Opcional
Aluminio y sus aleaciones	CA (Alta Frecuencia)	CC inversa
Latón y sus aleaciones	CC directa	CA (Alta Frecuencia)
Cobre y sus aleaciones	CC directa	-
Acero al carbono	CC directa	CA (Alta Frecuencia)
Acero Inoxidable	CC directa	CA (Alta Frecuencia)

Fuente: Manual de soldadura, Soldadura Eléctrica, MIG y TIG, Rodríguez, 2001. 1era edición, Librería y Editorial ALSINA.

El soplete utilizado para el proceso de GTAW consta de un mango, un sistema de collar para la sujeción del electrodo de tungsteno y una sistema de tobera a través del cual se eyecta el gas inerte (figura 2.9). Pueden poseer sistema de enfriamiento por aire o por agua. Cuando se utilizan corrientes por debajo de 150 Ampere, se emplea la refrigeración por aire. En cambio, cuando se utilizan corrientes superiores a 150 Ampere, se emplea refrigeración por agua. El agua puede ser recirculada mediante un sistema cerrado con un tanque de reserva, una bomba y un enfriador.



**Figura 2.9. Esquema de un soplete para soldadura TIG.**

Fuente: Manual de soldadura, Soldadura Eléctrica, MIG y TIG, Rodríguez, 2001. 1era edición, Librería y Editorial ALSINA.

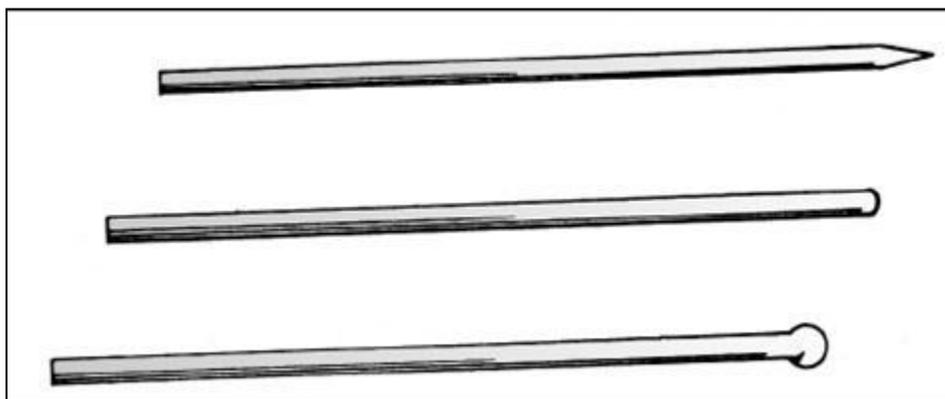
El collar cumple la finalidad de sujetar el electrodo de tungsteno y transmitirle la corriente eléctrica. Los hay de diferentes tamaños, y se usará el más apropiado al tamaño de electrodo seleccionado. Estos se encuentran clasificados según el sistema AWS, en el que poseen un código según la aleación con que se encuentran confeccionados (Tabla 2.5).

**Tabla 2.5. Códigos de collares según AWS.**

Código AWS	Composición [%]			
	Tungsteno	Thorio	Zirconio	Otros
<b>EWP</b>	99,5	-	-	0,50
<b>EWTh-1</b>	98,5	0,80 – 1,20	-	0,50
<b>EWTh-2</b>	97,5	1,70 – 2,20	-	0,50
<b>EWTh-3</b>	98,95	0,35 – 0,55	-	0,50
<b>EWZr</b>	99,20	-	0,15-0,40	0,50

Fuente: Manual de soldadura, Soldadura Eléctrica, MIG y TIG, Rodríguez, 2001. 1era edición, Librería y Editorial ALSINA.

Los electrodos originalmente no poseen forma. Antes de ser usados se les debe dar forma mediante mecanizado, desbaste o fundido. Los formatos pueden ser tres: en punta, media caña y bola (figura 2.10).



**Figura. 2.10. Formas posibles para electrodos de tungsteno.**

Fuente: Manual de soldadura, Soldadura Eléctrica, MIG y TIG, Rodríguez, 2001. 1era edición, Librería y Editorial ALSINA.

Los diámetros de los electrodos de tungsteno se seleccionan en función de la corriente empleada para la realización de la soldadura. En la Tabla 2.6 se dan los Parámetros aproximados para la soldadura TIG en aceros al carbono y de baja aleación, para posición plana en juntas a tope, juntas solapadas y filetes horizontales.

Las boquillas o toberas cumplen con dos funciones: la de dirigir el gas inerte sobre la zona de la soldadura, y la de proteger al electrodo. Las boquillas o toberas pueden ser de dos materiales diferentes: de cerámica y de metal. Las boquillas de cerámica son utilizadas en los sopletes con enfriamiento por *aire*, mientras que las *metálicas* son las utilizadas en los sopletes con enfriamiento por *agua*.

**Tabla 2.5. Parámetros aproximados para la soldadura TIG en aceros al carbono y de baja aleación, para posición plana en juntas a tope, juntas solapadas y filetes horizontales.**

<b>Espesor [mm]</b>	1,6	2,4	3,2	4,8	6,4	12,7
<b>Diámetro del electrodo [mm]</b>	1,6	1,6	2,4	2,4	3,2	3,2
<b>Angulo del electrodo [°]</b>	30	30	45	45	60	60
<b>Diámetro de la punta del electrodo [mm]</b>	0,8	0,8	1,1	1,1	1,1	1,5
<b>Corriente del arco [A]</b>	100-140	100-160	120-200	150-250	150-250	150-300
<b>Tensión del arco [V]</b>	12	12	12	12	12	12
<b>Diámetro del alambre [mm]</b>	1,6	1,6	1,6	2,4	3,2	3,2
<b>Velocidad de avance [mm/s]</b>	4,2	4,2	4,2	3,4	3,4	3,4
<b>Diámetro de la copa [mm]</b>	9,5	9,5	9,5	9,5	12,7	12,7
<b>Caudal de flujo de gas [L/min]</b>	9,4	9,4	9,4	9,4	11,8	11,8

Fuente: Soldadura por arco con electrodo de tungsteno no consumible, Laboratorio de metalografía y soldadura. Zalazar, 2001. Universidad Nacional del Comahue, Cuaderno F.I.

#### *2.4.4. Ventajas, limitaciones y problemas potenciales para TIG GTAW.*

Los beneficios más importantes de este proceso son:

- Produce soldaduras de buena calidad, generalmente libres de defectos.
- Esta libre de salpicaduras que ocurren con otros procesos de arco.
- Puede utilizarse con metal de aporte o sin él, según requiera la aplicación específica.
- Ofrece un control excelente de la penetración en la pasada de raíz.
- Puede producir soldaduras económicas a altas velocidades.
- Las fuentes de potencia son de costos relativamente bajos.
- Permite controlar de manera precisa las variables de soldadura.
- Sirve para soldar casi todos los metales incluso aleaciones disímiles
- Permite controlar en forma independiente la fuente de calor y la adición de metal de aporte.

Algunas de las limitaciones del proceso son:

- El soldador requiere un poco más de destreza y coordinación que con los otros procesos de soldadura.
- Para espesores mayores de 10 mm (3/8") resulta más costoso que los procesos con electrodo consumible.
- Es difícil proteger la zona de soldadura en lugares donde hay corrientes de aire.

Entre los problemas potenciales del proceso están:

- Puede haber inclusiones de tungsteno si se permite que el electrodo haga contacto con el bebedero líquido.

- Una inadecuada posición del metal de aporte podrá producir contaminación del mismo.
- Requiere buena calidad en el metal base y en el aporte.
- Puede haber contaminación o porosidad causada por fuga del refrigerante en el caso de refrigeración por agua.
- Puede haber golpe, o desviación del arco, al igual que en los otros procesos por arco.
- Puede presentarse corrosión por diferencia de temperatura, al igual que los otros procesos de soldadura, Los tratamientos térmicos tras la soldadura pueden provocar segregaciones en los bordes de grano o generar tensiones térmicas creando zonas anódicas.

## 2.5. Corrosión.

### 2.5.1. Descripción Preliminar.

Existen muchas definiciones para corrosión. La más comúnmente aceptada es la siguiente: *“Corrosión es el ataque destructivo de un metal por reacción química o electroquímica con su medio ambiente”*

Nótese que hay otras clases de daños, como los causados por medios físicos. Ellos no son considerados plenamente corrosión, sino *erosión* o *desgaste*. Existen, además, algunos casos en los que el ataque químico va acompañado de daños físicos y entonces se presenta una *corrosión-erosiva*, *desgaste corrosivo* o *corrosión por fricción*.

Aún así, la corrosión es un proceso natural, en el cual se produce una transformación del elemento metálico a un compuesto más estable, que es un óxido. De hecho, en su estado original los metales no se consiguen como elementos puros, sino que se consiguen en forma de minerales acompañados de otros elementos activos tales como el oxígeno, azufre y cloro.

El hombre invierte mucha energía para extraer el metal de los yacimientos encontrados en la Tierra. Si se piensa en el balance térmico global empleado durante la extracción del hierro en los altos hornos a partir de un mineral de hierro oxidado, tal como la hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), se nota que el hombre invierte grandes cantidades de energía termoquímica con el fin de liberar el hierro del oxígeno con la ayuda de coque (carbono), obteniéndose como productos la liberación de bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), escoria y el hierro primario, también llamado arrabio. En otros muchos procesos pirometalúrgicos tales como aquellos empleados para obtener cobre, zinc, níquel, plomo y otros metales, el consumo de energía ocurre de una manera similar. En estos procesos también se utilizan calor y atmósferas calientes como fuentes de energía para facilitar la obtención del metal. Otra manera alternativa para recuperar ciertos metales consiste en la descomposición de un electrolito por medio del paso de corriente eléctrica. Un electrolito es un medio iónico conductor de la electricidad. Puede ser una disolución acuosa de una sal conteniendo al metal de interés, por ejemplo, sulfato de cobre, o bien la misma sal fundida, la alúmina u óxido de aluminio como ejemplo. Esta descomposición ocurrirá, como se mencionó, por el efecto del paso de una corriente eléctrica a través del electrolito, dando como principal producto el depósito, en uno de los electrodos, del metal que interesa recuperar. De ésta y otras muchas maneras se puede obtener metal en forma libre, pero consumiendo grandes cantidades de energía.

Se entiende entonces que, el estado de existencia más estable para un metal es su forma combinada, o dicho desde un punto de vista termodinámico, es el estado de más baja energía, ya sea en forma de óxido, sulfuro, cloruro, sulfatos o carbonatos. En realidad lo que se hace para extraer el metal es ir en contra de una reacción que ocurre espontáneamente en la naturaleza, por ejemplo, la reacción de formación de un mineral oxidado. Muchas de las formas combinadas de los metales han permanecido tal y como se encuentran ahora por muchos miles de millones de años. Es muy posible que cuando los

elementos aparecieron en el universo, poco tiempo después de la creación de éste (hace aproximadamente 15 mil millones de años) muchas de las especies metálicas comenzaron a reaccionar con otros elementos recién formados. Con el paso del tiempo y con la formación y estabilización de galaxias y sistemas solares, muchos planetas, y entre ellos el nuestro, acumularon una gran cantidad de metales en su interior, que fueron reaccionando con el medio ambiente y con la atmósfera reinante entonces. El paso de metal a forma combinada fue cosa de millones de años. Lentamente, el metal iba pasando de un estado inestable a uno más estable que es la forma combinada. Aunado a esta transformación espontánea venía un cambio en energía. El sistema en proceso de transformación cedía energía lentamente y pasaba a un estado de energía mínima, a un estado estable, en equilibrio.

Industrialmente, lo que se hace hoy en día es suministrar al mineral una cantidad de energía equivalente a la que la reacción cedió a través de mucho tiempo para pasar a la forma combinada. Al obtener un metal en forma libre volvemos al estado inicial. El metal libre, que posee una energía elevada y con fuertes tendencias a bajarla, tenderá a estabilizarse, reaccionando con el medio ambiente y volviendo a su forma de mineral original. El cobre, el cinc, el níquel, el cromo, el hierro, el aluminio, el plomo, el estaño y la mayoría de los metales ingenieriles que se utilizan, sufren esa tendencia después de ser obtenidos en su forma libre. Se puede decir, como una aceptable generalización, que cuanto mayor haya sido la cantidad de energía invertida en la obtención de un metal a partir de su mineral (térmica, eléctrica o de otro tipo), mayor será su tendencia a volver a combinarse para estabilizarse. (Figura 2.11)

Se observa que la definición desarrollada hasta ahora no incluye a los materiales no-metálicos. Otros materiales, como el plástico o la madera no sufren corrosión; pueden agrietarse, degradarse, romperse, pero no corroerse.

Generalmente se usa el término “oxidación” o “herrumbre” para indicar la corrosión del hierro y de aleaciones en las que éste se presenta como el metal base, que es una de las más comunes.

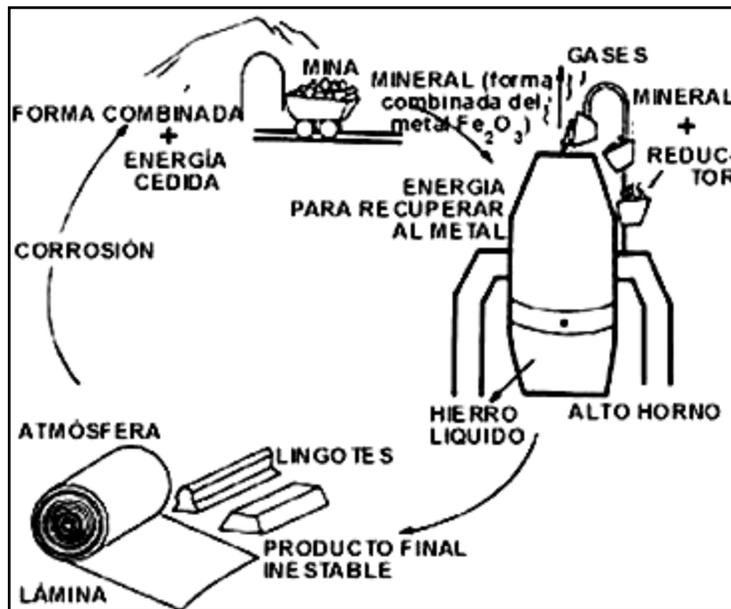


Figura 2.11. Ciclo que sigue el hierro hasta volver a su estado estable.

Fuente: Más allá de la Herrumbre I. Ávila y Genescá, 1987. Biblioteca digital, La Ciencia Para todos, Fondo de Cultura Económica, S. A. DE C. V.

### 2.5.2 Mecanismos Electroquímicos de la Corrosión.

Una celda electroquímica es una combinación del tipo siguiente: un conductor electrolítico (metal), un conductor iónico (electrolito) y un conductor electrónico (metal).

En ella pueden tener lugar procesos electroquímicos con el paso de una corriente eléctrica. Si la celda electroquímica produce energía eléctrica, causada por el consumo de energía química, se dice que es una *celda galvánica o pila*. Si, en cambio, la celda electroquímica consume corriente de

una fuente de corriente externa, almacenando como consecuencia energía química, se dice que es una *celda electrolítica*.

Algunas celdas galvánicas reciben nombres especiales. Una *celda de corrosión* es una celda o pila galvánica en la cual las reacciones electroquímicas que tienen lugar conducen a la corrosión. Una celda de corrosión de dimensiones muy pequeñas (por ejemplo  $< 0.1\text{mm}$ ) se conoce como *celda de acción localizada* o *microcelda galvánica*. Las celdas locales o micropilas se dan, por ejemplo, en aleaciones multifásicas o en metales con recubrimientos que presentan buena conductividad eléctrica o en inclusiones de óxidos, sulfuros, carbón, entre otros. La acción de estas celdas a menudo conduce a un ataque localizado, tal como picaduras o corrosión bajo tensión. (Guthrie et al, 2001)

### 2.5.3 Definición de Ánodo y Cátodo.

Para la notación de los dos electrodos en una celda electroquímica (galvánica o electrolítica) son válidas las siguientes definiciones generales: El *ánodo* es el electrodo en el cual, o a través del cual, la corriente positiva pasa hacia el electrolito. El *cátodo* es el electrodo en el cual entra la corriente positiva proveniente del electrolito.

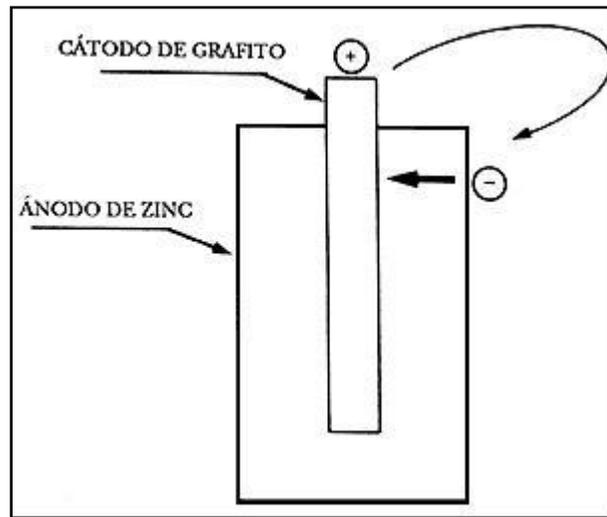
Generalmente, se toman como válidas las siguientes reglas:

a) La reacción anódica es una oxidación y la reacción catódica una reducción.

b) Los aniones (iones negativos) migran hacia el *ánodo* y los cationes (iones positivos) hacia el *cátodo*. Hay que hacer notar que particularmente en una celda galvánica, por ejemplo en una pila seca (Figura 2.12), la corriente positiva fluye del polo (+) al (-) en el circuito externo, mientras que dentro de la celda, la corriente positiva fluye del (-) al (+).

La corrosión electroquímica es un proceso espontáneo que denota siempre la existencia de una zona anódica (la que sufre la corrosión), una

zona catódica y un electrolito, y es imprescindible la existencia de estos tres elementos, además de una buena unión eléctrica entre ánodos y cátodos, para que este tipo de corrosión pueda tener lugar. La corrosión más frecuente siempre es de naturaleza electroquímica y resulta de la formación sobre la superficie metálica de multitud de zonas anódicas y catódicas; el electrolito es, en caso de no estar sumergido o enterrado el metal, el agua condensada de la atmósfera, para lo que la humedad relativa deberá ser del 70%.



**Figura 2.12. Dirección de la corriente positiva en una pila seca.**

Fuente: Más allá de la Herrumbre I. Ávila y Genescá, 1987. Biblioteca digital, La Ciencia Para todos, Fondo de Cultura Económica, S. A. DE C. V.

El proceso de disolución de un metal en un ácido es igualmente un proceso electroquímico. La infinidad de burbujas que aparecen sobre la superficie metálica revela la existencia de infinitos cátodos, mientras que en los ánodos se va disolviendo el metal. A simple vista es imposible distinguir entre una zona anódica y una catódica, dada la naturaleza microscópica de las mismas (micropilas galvánicas). Al cambiar continuamente de posición las zonas anódicas y catódicas, llega un momento en que el metal se disuelve totalmente.

Las reacciones que tienen lugar en las zonas anódicas y catódicas son las siguientes:



Ya que la corrosión de los metales en ambientes húmedos es de naturaleza electroquímica, una aproximación lógica para intentar parar la corrosión sería mediante métodos electroquímicos. Los métodos electroquímicos para la protección contra la corrosión requieren de un cambio en el potencial del metal para prevenir o al menos disminuir su disolución.

#### 2.5.4 Termodinámica de la Corrosión Acuosa.

La tendencia para que ocurra una reacción química, incluyendo la reacción de un metal con su medio ambiente es medida por la energía libre de Gibbs o  $\Delta G$ . En termodinámica, la energía libre de Gibbs (o entalpía libre) es un potencial termodinámico, es decir, una función de estado extensiva con unidades de energía, que da la condición de equilibrio y de espontaneidad para una reacción química (a presión y temperatura constantes). El valor más negativo de  $\Delta G$  indica la mayor tendencia para que la reacción ocurra. A temperatura constante, la energía libre puede expresarse como:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2.6)$$

Donde:

$\Delta G$ : Es el cambio de la energía libre de Gibbs. [kJ]

$\Delta H$ : Es el cambio de la entalpía. [kJ]

$T$ : Es la temperatura absoluta. [K]

$\Delta S$  : Es el cambio de la entropía.  $[\frac{kJ}{K}]$

Pero la tendencia a la corrosión no es una medida o función de la velocidad de reacción. Un gran valor de  $\Delta G$  puede o no estar acompañado por una alta velocidad de corrosión, pero cuando el  $\Delta G$  es positivo, puede decirse con certeza que la reacción no se llevará a efecto en la forma descrita. Cuando  $\Delta G$  es negativo, la velocidad de reacción puede ser lenta o rápida dependiendo de muchos factores. (Guthrie et al, 2001)

En vista de los mecanismos electroquímicos de corrosión, la tendencia de un metal a corroerse puede ser expresada también en términos de la fuerza electromotriz o *fem* de las celdas de corrosión, que son una parte integral de los procesos de corrosión. Ya que la energía eléctrica es expresada como el producto de voltios \* coulomb (Joules), la relación entre  $\Delta G$  y la *fem* está definida por:

$$\Delta G = -Enf \quad (2.7)$$

Donde:

$\Delta G$  : Es el cambio de la energía libre de Gibbs. [J]

$E$  : Es el voltaje de la celda (*fem*). [V]

$n$  : Es el número de electrones o equivalentes químicos que toman parte de la reacción.

$f$  : Es el Faraday ó  $96.500 \frac{\text{coulomb}}{\text{equivalente químico}}$

De acuerdo con esto, un mayor valor de  $E$  (*fem*) para una celda dará una mayor tendencia para que ocurran todas las posibles reacciones de la celda. (Guthrie et al, 2001)

### 2.5.5 Efecto del Oxígeno Disuelto.

A temperaturas ordinarias en aguas neutras, el oxígeno disuelto es necesario para que exista apreciable corrosión del hierro. En agua saturada de aire, la velocidad de corrosión inicial puede alcanzar un valor de 100 mdd (miligramos por decímetros cuadrados por día, mg/dc<sup>2</sup>/día), pero esta velocidad disminuye en un período de días, tiempo en el cual se forma una película de óxido de hierro que actúa como barrera para la difusión del O<sub>2</sub>, por lo tanto hasta una concentración crítica de O<sub>2</sub> disuelto la velocidad de corrosión del hierro es proporcional a la concentración de oxígeno. (Uzcátegui, 1973)

En ausencia del O<sub>2</sub> disuelto, la velocidad de corrosión a temperatura ambiente es despreciable tanto para el hierro puro como para aceros.

Aunque un incremento en la concentración de oxígeno primero acelera la corrosión, está demostrado que después de una concentración crítica, la velocidad de corrosión desciende de nuevo a un valor mínimo. En agua destilada, la concentración crítica de O<sub>2</sub> por encima de la cual la corrosión disminuye es cerca de 12mm de O<sub>2</sub>/litro. Este valor aumenta con las sales disueltas y con la temperatura, y disminuye con los incrementos de velocidad y el ph. (Uzcátegui, 1973)

El decrecimiento en la velocidad de corrosión es causado por la pasivación del hierro por el oxígeno, aparentemente a una presión parcial mas elevada, mas oxígeno alcanza la superficie del metal que puede ser reducido por la reacción de corrosión.



Por lo tanto el exceso está disponible para formar películas pasivas. En concentraciones apreciables de cloruros (como el agua de mar), la pasividad del hierro no está establecida del todo, y en tal medio el incremento de la

presión de oxígeno, lo que hace es incrementar la velocidad de corrosión. (Uzcátegui, 1973)

#### *2.5.6 Efecto de la Temperatura.*

Cuando la corrosión es controlada por la difusión del oxígeno, la velocidad de corrosión a una concentración dada de  $O_2$  es aproximadamente el doble para un incremento de 30 K (30°C) en la temperatura. En un recipiente abierto que permita el escape del  $O_2$  disuelto, la velocidad se incrementa con la temperatura hasta los 353,15 K (80°C) aproximadamente y luego cae, mientras que en un recipiente cerrado, el  $O_2$  no puede escapar la velocidad de corrosión continúa aumentando hasta que el  $O_2$  es totalmente consumido.

Cuando la corrosión está acompañada por la evolución de hidrógeno, el incremento en la velocidad es más del doble para los 30 K (30°C) de aumento de la temperatura. (Uzcátegui, 1973)

#### *2.5.7 Efecto del pH.*

El efecto del pH en la corrosión del hierro en agua (aireada a temperatura ambiente) ocurre de la siguiente manera. Dentro del rango de pH 4 a 10, la velocidad de corrosión es independiente del pH y depende sólo de cómo el oxígeno difunde rápidamente en la superficie del hierro, se ha demostrado que dentro de este rango la superficie del hierro está en contacto con una solución saturada alcalina de óxido ferroso hidratado que forma una especie de película con un pH aproximadamente de 9,5. En este rango de pH, la longitud de la superficie catódica aparentemente no es importante y fue evidenciado por un experimento de Whitman y Russel quienes expusieron al agua corriente varias muestras de acero, unas totalmente desnudas y otras recubiertas con cobre en un 75% del área superficial. La pérdida en peso reportada en la totalidad de los mismos se encontró que era igual para los cubiertos y no cubiertos de cobre, toda la cantidad de  $O_2$  que alcanza las

áreas catódicas de la superficie del hierro, producen a si mismo una cantidad equivalente de  $Fe^{++}$ . Dentro de este rango no tienen efecto la variación de la composición ni los tratamientos térmicos. (Uzcátegui, 1973)

Dentro del rango ácido ( $pH < 4$ ), la película de óxido ferroso hidratado es disuelta, el pH superficial cae, y el hierro está más o menos en contacto directo con el medio acuoso, luego el incremento en la velocidad de reacción está determinada por la suma de los efectos de la velocidad de evolución del hidrógeno y el carácter despolarizador del oxígeno. En este caso tienen efectos los tratamientos térmicos que proporcionan mayor o menor sobre voltaje de hidrógeno en las fases presentes en los aceros al carbono, por ejemplo, en un acero de bajo carbono la *cementita* es una fase de bajo sobrevoltaje de hidrógeno, la velocidad de corrosión será más baja en un medio ácido que la de los aceros altos en carbono. (Uzcátegui, 1973)

En el rango de  $pH > 10$ , la velocidad de corrosión decrece rápidamente, debido a que se incrementa la alcalinidad del medio aumentando así el pH de la superficie del hierro, llegando éste a ser más pasivo. En este rango el efecto de las impurezas en concentraciones normales no es pronunciado al igual que los factores metalúrgicos que tampoco presentan mayores efectos. (Uzcátegui, 1973).

### 2.5.8 Clasificación de la Corrosión.

La corrosión no se produce siempre de la misma forma ni ocasiona los mismos efectos, aunque en la práctica, los distintos tipos de corrosión se dan juntos y se pueden presentar en diversas formas, en partes diferentes de la instalación. Tradicionalmente, la corrosión se clasifica como sigue:

#### 2.5.8.1. Corrosión uniforme (Generalizada).

Se caracteriza por una reacción electroquímica que actúa en la superficie completa del material expuesto. La tasa de corrosión es presentada a menudo como una pérdida de peso. Es relativamente fácil de controlar por

medio de coberturas protectoras, inhibidores o protección catódica, debido a que permite un mayor seguimiento y prevención. Este tipo de corrosión es muy predecible, y es la base de la mayoría de las ecuaciones para la predicción de la corrosión. (Guthrie et al, 2001).

#### 2.5.8.2. Corrosión galvánica.

Es causada por una reacción electroquímica entre dos metales disímiles en contacto o eléctricamente conectados uno con el otro en un electrolito. En un medio corrosivo, los dos metales diferentes forman un electrodo cortocircuitado y constituyen una celda electroquímica.

El uso de distintos metales en una solución corrosiva no significa que la corrosión galvánica sea inevitable. Los factores que influyen en la corrosión galvánica son la conductividad del circuito, el potencial entre ánodo y cátodo, el efecto de la polarización, la relación entre las áreas del cátodo y el ánodo, y la relación geométrica entre superficies de distintos metales.

La corrosión se atribuye frecuentemente a la acción galvánica cuando su verdadera causa se debe efectivamente a unas condiciones anormales de operación. Así por ejemplo, el uso de ácido clorhídrico, para sustituir un material de limpieza normal, puede destruir la película pasiva del material. En tal caso se puede formar una celda galvánica que empezará a funcionar tan pronto como la pieza en cuestión entre en función. (Guthrie et al, 2001).

#### 2.5.8.3. Corrosión por grietas.

Es una forma de corrosión localizada que ocurre dentro de las zonas de estancamiento creadas por las interfaces de dos superficies. La corrosión por agrietamiento puede ocurrir bajo arandelas, tornillos, juntas, anillos de sellado, remaches, abrazaderas, entre otros. Los diversos factores ambientales que causan la corrosión por grietas la hacen casi imposible de simular las condiciones de campo en el laboratorio, así como también el empleo de pruebas para acelerarla. (Guthrie et al, 2001).

#### 2.5.8.4. Corrosión por picaduras.

Es una forma de corrosión localizada que actúa con una tasa mínima de pérdida de metal, lo que dificulta su detección. Debido a que los pequeños agujeros que se forma pueden quedar tapados con los productos de la corrosión. Por este motivo la corrosión por picadura suele ocasionar de repente fallos inesperados. Las picaduras comienzan en aquellas zonas donde se produce un incremento de la velocidad de corrosión, como por ejemplo, en impurezas u otras heterogeneidades presentes en los metales. (Guthrie et al, 2001).

#### 2.5.8.5. Corrosión intergranular.

Este fenómeno ocurre con más frecuencia en las fronteras de grano, usualmente con poco o despreciable ataque a los granos adyacentes. En estos casos se produce una corrosión intergranular que origina una disminución importante de la resistencia mecánica del material. (Guthrie et al, 2001).

#### 2.5.8.6. Corrosión por erosión.

Se trata de un fenómeno de corrosión, unido a desgastes superficiales provocados por la fricción entre dos superficies sólidas, que da lugar a que partículas de óxido unidas a la superficie de un material se desprendan y actúen a modo de abrasivo entre las superficies en contacto. También se produce corrosión erosiva en las superficies que se encuentran en contacto con líquidos que circulan a alta velocidad. Partículas extrañas y/o burbujas de aire o vapor en suspensión que entran en contacto con la superficie de un material, se comportan como diminutas limas. (Guthrie et al, 2001).

#### 2.5.8.7. Corrosión por tensión.

Es inducida por la acción combinada de la fatiga mecánica y el proceso de corrosión. Los esfuerzos estáticos de tracción, unido con la exposición del material a una atmósfera determinada, provoca una situación similar a la

fatiga. Conforme transcurre el tiempo, las fisuras que se originan en un material que sufre corrosión bajo tensión crecen de tamaño. Cuando una de estas fisuras sea lo suficientemente grande produce, sin previo aviso, una fractura, que se puede presentar, al igual que en el caso de la fatiga, bajo tensiones inferiores al límite elástico del material. (Guthrie et al, 2001).

#### 2.5.8.8. Corrosión salina neutra.

Es aquella producida por un ambiente marino sin presencia de componentes ácidos (ph balanceado; alrededor de 7). Es fácilmente reproducible en cámaras de ensayos de corrosión acelerada.

#### 2.5.8.9. Corrosión salina ácida.

Este tipo de corrosión se produce por ambientes activos en los cuales, además de la presencia de sales diversas tales como cloruro de sodio (NaCl), sulfato de cobre ( $\text{SO}_4\text{Cu}$ ), entre otras, pueden existir concentraciones de ácidos, tales como ácido acético procedente de las siliconas empleadas en la carpintería, ácido úrico en las granjas, entre otros.

# CAPÍTULO 3

## *Marco Metodológico*

---

---

En este capítulo se describe cada una de las actividades a seguir para la elaboración del trabajo de grado, que permiten precisar los detalles del proyecto y establecer las técnicas a utilizar para obtener los mejores resultados, además de definir la forma de encontrar las respuestas a las interrogantes que inducen al estudio.

### **3.1. Nivel de la Investigación.**

Para desarrollar y dar respuesta a la problemática planteada, se deben establecer los niveles de estudio que se aplicarán a la investigación. Ésta se caracteriza por ser de tipo experimental, debido a que se deben reproducir condiciones en el laboratorio (banco de ensayo) para producir corrosión en las muestras de acero.

Por otra parte la investigación será de tipo explicativa, ya que cuando se finalice el estudio de corrosión (en solución salina expuesta a tres períodos de tiempo diferentes) se buscará conocer las relaciones causa-efecto entre los fenómenos ocurridos. El análisis correlacional, fija la dirección o el sentido en que se busca relacionar a las variables involucradas en el fenómeno de corrosión del conjunto a estudiar.

La investigación se basa en la caracterización del fenómeno que constituye la realización de ensayos de corrosión con rocío salino en juntas de acero ASTM A 178 soldadas a tope a través del proceso TIG, para determinar el comportamiento con diferentes magnitudes de corriente (baja, media y alta) para soldar y tres períodos diferentes de exposición a la corrosión (48, 96, y 168 horas según recomienda la norma ASTM designación **B 117- 07**).

### **3.2. Diseño de la Investigación.**

Las estrategias que se aplicarán para dar respuesta al planteamiento del problema, son la investigación documental, asistida por información “Web” (sitios en Internet y revistas electrónicas), consultas bibliográficas, consulta a personas que dominan la materia y trabajos de investigación. También se adoptará la investigación experimental como estrategia fundamental, mediante la realización de ensayos de laboratorio.

### **3.3. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.**

La recolección de los datos se realiza mediante la observación directa de los ensayos aplicados a las muestras. Los resultados y evidencias obtenidas, serán recopilados en un formato establecido tales como gráficas, tablas, fotografías. Estas técnicas son aplicables a los ensayos de corrosión, tracción, dureza y metalografía. Estos ensayos se realizarán utilizando las normas correspondientes para justificar su validez.

### **3.4. Técnicas de Procesamiento de Datos.**

A los datos recolectados se le aplicarán el análisis comparativo; mediante la realización de ensayos con probetas expuestas a la corrosión y probetas (soldadas de manera similar) no expuestas al medio corrosivo. Con

el fin de establecer cómo varían las propiedades mecánicas en estudio con la exposición a la corrosión acuosa.

### **3.5. Adquisición del material de estudio.**

El material que será objeto de estudio fue suministrado por la empresa Avellán, la cual se dedica al diseño, construcción y mantenimiento de calderas, intercambiadores de calor, entre otros equipos para la industria en general. La empresa realizó una donación de catorce (14) pedazos de tubo de dos y media (2 ½) pulgada de diámetro, tres (3) milímetros de espesor y un metro de longitud promedio, de acero ASTM A 178 grado A, cuya composición química y propiedades mecánicas teóricas se muestran en las tablas 2.1 y 2.2 respectivamente, el cual es utilizado para la construcción y reparación de las calderas en su proceso productivo.

### **3.6. Elaboración de las probetas.**

Las probetas se realizarán a partir de tubos de acero ASTM A 178 de dos y media (2 ½) pulgada de diámetro, tres (3) milímetros de espesor y de entre ochenta (80) y ciento veinte (120) centímetros de longitud.

#### *3.6.1. Diseño y realización del corte del material de estudio.*

##### 3.6.1.1. Material de probetas para ensayo de tracción.

Para las probetas soldadas para tracción se tomarán cuatro (4) de los tubos de acero ASTM A 178 que tengan al menos ciento diez (110) centímetros de longitud y se cortarán transversalmente utilizando una máquina automática para cortar tubos de modo que se formen cinco (5) anillos (desechando el material sobrante en ambos bordes) de la siguiente configuración para cada tubo:

- Dos (2) anillos “cortos” de 130mm de longitud.

- Tres (3) anillos “largos” de 260mm de longitud.

Esta configuración permite un mejor manejo del tubo para mecanizar las probetas, además de que los anillos son de longitud suficiente para elaborar las mismas.

En la figura 3.1 se observa (de izquierda a derecha) el primer anillo corto (130mm), luego dos anillos largos (260mm), luego otro anillo corto (130mm); estos son los que serán sometidos al proceso de soldadura. El anillo restante (260mm de longitud) será utilizado para realizar estudios de caracterización del material, así se comprobará que todos los tubos empleados son del material en estudio y pertenecen a la misma colada.



**Figura 3.1. Representación de los anillos para las probetas de tracción obtenidos mediante el corte de los tubos.**

Fuente: Propia

#### 3.6.1.2. Material de probetas para ensayo de dureza y metalografía.

Para las probetas soldadas para dureza y metalografía se tomará uno (1) de los tubos de acero ASTM A 178 que tenga al menos sesenta (60) centímetros de longitud y se cortará transversalmente utilizando una máquina automática para cortar tubos de modo que se formen cinco (5) anillos (desechando el material sobrante en ambos bordes) de la siguiente configuración para cada tubo:

- Dos (2) anillos “cortos” de 60mm de longitud.
- Dos (2) anillos “medianos” de 120mm de longitud.
- Un (1) anillo “largo” de 260mm de longitud.

Esta configuración permite un mejor manejo del tubo para mecanizar las probetas, además de que los anillos son de longitud suficiente para elaborar las mismas.

En la figura 3.2 se observa (de izquierda a derecha) el primer anillo corto (60mm), luego dos anillos medianos (120mm), luego otro anillo corto (60mm); estos son los que serán sometidos al proceso de soldadura. El anillo largo (260mm de longitud) será utilizado para realizar estudios de caracterización del material, así se comprobará que todos los tubos empleados son del material en estudio y pertenecen a la misma colada.



**Figura 3.2. Representación de los anillos para las probetas de dureza y metalografía obtenidos mediante el corte de los tubos.**

Fuente: Propia

### *3.6.2. Proceso de elaboración de las juntas soldadas.*

Los tubos ya cortados (anillos) se deberán unir de manera permanente utilizando el proceso de soldadura TIG (GTAW). Para realizar las juntas soldadas se empleará una máquina soldadora orbital automática, cuyas características se muestran en la tabla 3.1, que se encuentra en el Centro

Nacional de Soldadura (INCES) y que será operada por un soldador especializado de la misma institución. El proceso a emplear será el de gas inerte protector y electrodo de tungsteno (TIG, por sus siglas en inglés) ó soldadura de arco eléctrico con electrodo de tungsteno y gas protector (GTAW por sus siglas en inglés).

**Tabla 3.1. Características de la Máquina de soldar utilizada.**

<b>Marca</b>	ESAB
<b>Modelo</b>	Protig 450
<b>Conexión</b>	208 / 230 / 460 / 475 V, 3 fases, 60 Hz
<b>Rango de trabajo</b>	5 – 450 A, 10 – 28 V

Fuente: Catálogo ESAB, 2009.

#### 3.6.2.1. Equipos utilizados.

- Máquina de soldar marca ESAB, modelo Protig 450, mostrada en la figura 3.3.



**Figura 3.3. Máquina para soldadura automática utilizada.**

Fuente: ESAB, 2009.

- Equipo de preparación de electrodos de tungsteno, utilizado para afilar la punta y remover las impurezas del mismo, con disco diamantado de 2100 rpm.
- Esmeril utilizado para eliminar la rebaba originada por la cuchilla al cortar los tubos transversalmente. También se utilizó para eliminar la cascarilla (restos de tratamientos térmicos) que pudiese contaminar la junta en la superficie cercana a la soldadura.
- Pinzas orbitales, PRB 33-90, mostradas en la figura 3.4.



**Figura 3.4. Pinzas orbitales utilizadas.**

Fuente: ESAB, 2009.

- Prensa empleada para sujetar las secciones (anillos) al momento de realizar el proceso de unión.
- Máscara para soldar.
- Recipiente colector de gas inerte.
- Mesa de sujeción, guantes de protección contra quemaduras.

#### 3.6.2.2. Materiales utilizados.

- Electrodo de Tungsteno EWTh-2 (2% Torio, Color Rojo) de diámetro 2,4 mm (3/32”), afilado en punta con ángulo de 45°.
- Tobera de porcelana sin filtro.

- Gas Argón al 99,99%: denominación A.W.S SG-A, distribuido por A.G.A. gas.

### 3.6.2.3. Parámetros de las soldaduras.

Para la selección de los parámetros adecuados para la soldadura, se realizaron tres juntas (o uniones) utilizando piezas del material de estudio (ASTM A178 grado A) con diferentes características. Luego de fijar los parámetros, sólo se variarán los valores de corriente, con el fin de establecer comparaciones entre las diferentes juntas para determinar que valor es el más apropiado, pero el resto de los parámetros permanecerán constantes (debido a que sólo se estudiará el efecto de la intensidad de corriente en la corrosión), por lo que deben seleccionarse sus valores más adecuados basados en los principios teóricos y la experiencia del soldador especializado.

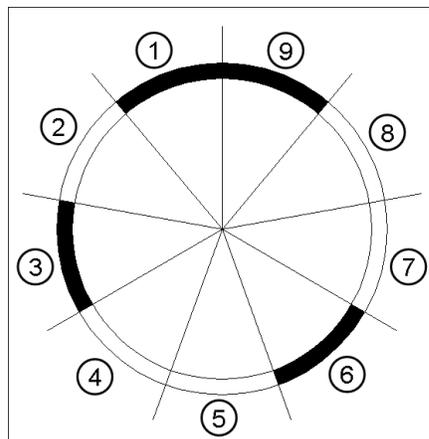
El gas protector a utilizar será el argón, por su economía (en comparación con el helio) y es el que se recomienda para la aplicación según la tabla 2.2 (Rodríguez, 2001). El flujo de argón (gas protector) será constante y se fijará en 1,13 m<sup>3</sup>/h; valor seleccionado por el soldador, ya que según su experiencia es el adecuado para esta soldadura (TIG en acero de bajo carbono). Según el material, un tipo de corriente adecuado es alterna de alta frecuencia con polaridad negativa en el electrodo de tungsteno, con el fin de generar la mayor cantidad de calor en el material, por lo tanto se seleccionará esta condición (Rodríguez, 2001).

Las características del electrodo, la tensión del arco (V) y la velocidad de avance se seleccionaron tomando como referencia los valores mostrados en la tabla 2.5 (Zalazar, 2001) según el espesor del material (3 mm) y se consultaron con el soldador, quien realizó sólo pequeños ajustes a los valores.

Para el proceso de soldadura de tuberías empleando un equipo orbital automático, es preciso dividir la circunferencia a soldar en zonas o sectores, debido a que la acción de la gravedad es diferente en cada zona del tubo; es

decir, en la parte superior la fuerza gravitacional ayuda a mantener el material fundido en su posición, pero a medida que se avanza va cambiando la posición relativa entre el electrodo y el tubo por lo que el efecto de la gravedad cambia a lo largo de la circunferencia.

Se dividió imaginariamente la circunferencia de los tubos a soldar en nueve (9) sectores como se muestra en la figura 3.5, en la cual las zonas oscuras (negras) representan las partes que se soldarán con alta intensidad de corriente mientras que las zonas claras (blancas) son aquellas en las que se utilizará baja intensidad de corriente, es decir, para cada junta existirá un rango de valores en vez de un valor de intensidad de corriente. Nótese que los sectores blancos se encuentran en las zonas críticas; al comenzar la soldadura (sector 2) para no sobrecalentar el material, cuando el electrodo está hacia arriba (sectores 4 y 5) y cuando va subiendo (7 y 8) porque va en contra de la gravedad. La secuencia de los números de la figura 3.5 señala el sentido de giro en que se realizó la soldadura (contrario a las agujas del reloj).



**Figura 3.5. Esquema de los sectores imaginarios en los que se dividió la circunferencia.**

Fuente: Propia

Como ya se ha explicado, se variará la intensidad de corriente para las diferentes juntas entre tres (3) rango de valores; bajo, medio y alto. Para saber cuáles serían estos valores se realizaron pruebas a diferentes corrientes

dentro del rango de 60 - 100 A y utilizando el resto de los parámetros en sus valores recomendados. Como resultado de éstas pruebas se seleccionaron los siguientes valores de corriente:

- Como corriente baja se varió entre los valores 60 y 70 A, así, la tabla 3.2 muestra el valor asignado de corriente para cada sector.

**Tabla 3.2. Valores de corriente para cada sector en la junta con intensidad baja.**

<b>Sector</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Intensidad de Corriente (A)</b>	70	60	70	60	60	70	60	60	70

Fuente: Propia

- Como corriente media se varió entre los valores 70 y 80 A, así, la tabla 3.3 muestra el valor asignado de corriente para cada sector.

**Tabla 3.3. Valores de corriente para cada sector en la junta con intensidad media.**

<b>Sector</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Intensidad de Corriente (A)</b>	80	70	80	70	70	80	70	70	80

Fuente: Propia

- Como corriente alta se varió entre los valores 80 y 90 A, así, la tabla 3.4 muestra el valor asignado de corriente para cada sector.

**Tabla 3.4. Valores de corriente para cada sector en la junta con intensidad alta.**

<b>Sector</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Intensidad de Corriente (A)</b>	90	80	90	80	80	90	80	80	90

Fuente: Propia

A continuación, en la tabla 3.5 se muestran los valores del resto de los parámetros utilizados en las soldaduras.

**Tabla 3.5. Parámetros de la soldadura.**

<b>Tipo de junta</b>	A tope, sin bisel
<b>Material de aportación</b>	Sin material de aportación (Autógena)
<b>Voltaje (V)</b>	12
<b>Tipo de corriente</b>	Corriente Alterna de Alta Frecuencia
<b>Polaridad del electrodo</b>	Negativa (-)
<b>Velocidad de avance (mm/min)</b>	200
<b>Gas protector</b>	Argón
<b>Tiempo de pre-flujo de gas (s)</b>	3
<b>Flujo de gas constante (m<sup>3</sup>/h)</b>	1,13

Fuente: Propia

Finalmente, se procederá a realizar las soldaduras bajo la siguiente configuración:

- Se unirán cuatro (4) de las secciones o anillos de uno de los tubos para tracción (figura 3.1, descartando la sección de caracterización) tal que en los extremos se encuentren los anillos “cortos”, mediante tres (3) juntas iguales empleando los parámetros de la tabla 3.5 y los valores de corriente de la tabla 3.2.
- Se unirán cuatro (4) de las secciones o anillos de uno de los tubos para tracción (figura 3.1, descartando la sección de caracterización) tal que en los extremos se encuentren los anillos “cortos”, mediante tres (3)

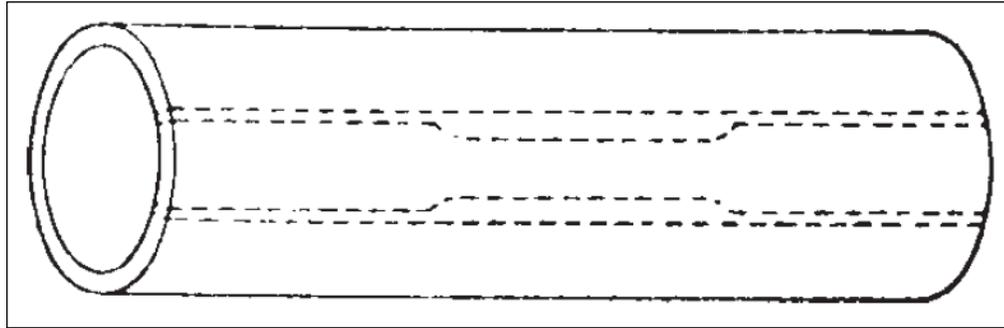
juntas iguales empleando los parámetros de la tabla 3.5 y los valores de corriente de la tabla 3.3.

- Se unirán cuatro (4) de las secciones o anillos de uno de los tubos para tracción (figura 3.1, descartando la sección de caracterización) tal que en los extremos se encuentren los anillos “cortos”, mediante tres (3) juntas iguales empleando los parámetros de la tabla 3.5 y los valores de corriente de la tabla 3.4.
- Se unirán cuatro (4) de las secciones o anillos de uno de los tubos para tracción (figura 3.1, descartando la sección de caracterización) tal que en los extremos se encuentren los anillos “cortos”, mediante tres (3) juntas; todas utilizando los parámetros de la tabla 3.5 pero una con los valores de corriente de la tabla 3.2, la siguiente con los valores de corriente de la tabla 3.3 y la otra con los valores de corriente de la tabla 3.4.
- Se unirán cuatro (4) de las secciones o anillos del tubo para dureza y metalografía (figura 3.2, descartando la sección de caracterización) tal que en los extremos se encuentren los anillos “cortos”, mediante tres (3) juntas; todas utilizando los parámetros de la tabla 3.5 pero una con los valores de corriente de la tabla 3.2, la siguiente con los valores de corriente de la tabla 3.3 y la otra con los valores de corriente de la tabla 3.4.

### *3.6.3. Elaboración de las probetas de tracción.*

Para la elaboración de las probetas de tracción se realizó una comparación entre las normas ASTM E 8M - 04 (para probetas de tracción sin soldadura) y AWS B4.0 (para probetas de tracción con soldaduras), con el fin de homologar las medidas para las probetas de tracción, es decir; tener unas dimensiones que cumplan tanto para las probetas de tracción de caracterización como para las probetas de tracción con soldadura.

La figura 3.6 muestra como obtener una probeta para ensayo de tracción a partir de una sección de tubería, en donde la línea punteada representa la silueta del corte a efectuarse para obtener la probeta de tracción según la norma ASTM E 8M - 04.

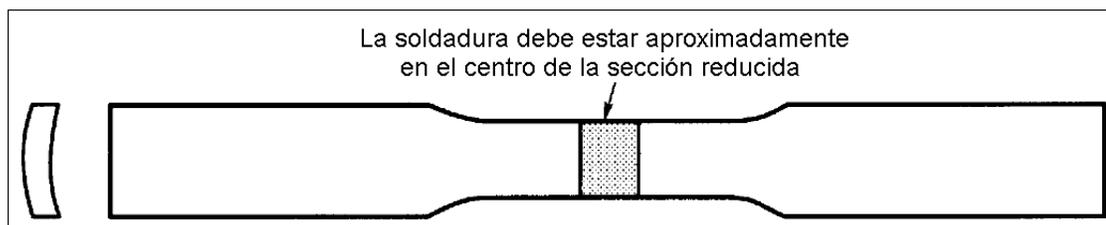


**Figura 3.6. Localización del corte para la probeta de tracción longitudinal a la tubería.**

Fuente: Norma ASTM E 8M - 04.

Es de hacer notar que tanto las probetas de caracterización como las probetas que tienen soldadura, el proceso de fabricación será el mismo a diferencia de que en las últimas se deberá tener la precaución de localizar la junta soldada en el centro de la probeta como lo ilustra la figura 3.7.

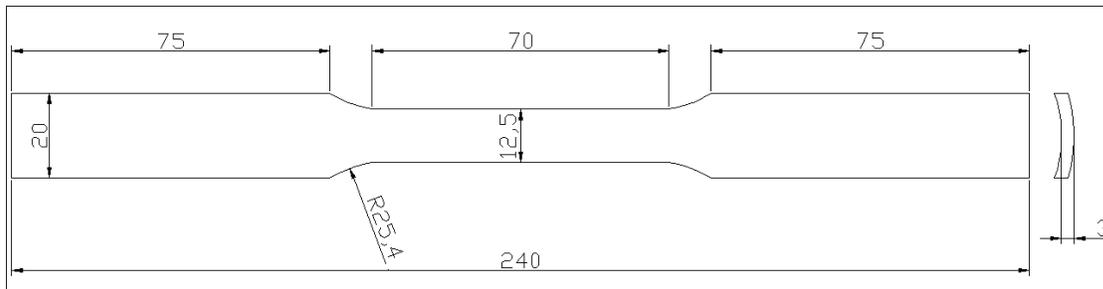
Todas las probetas de tracción serán realizadas utilizando un banco de mecanizado C.N.C., marca Victor, de la empresa Metalmecánica Dalor, C.A. ubicada en Guacara, estado Carabobo, y será operada por un técnico Especializado.



**Figura 3.7. Esquema de la probeta soldada para tracción.**

Fuente: Norma AWS B4.0

En consecuencia, las medidas seleccionadas para las probetas de tracción y que cumplen con las normas ASTM E 8M - 04 y AWS B4.0 se muestran en la figura 3.8.



**Figura 3.8. Dimensiones para las probetas de tracción.**

Fuente: Propia

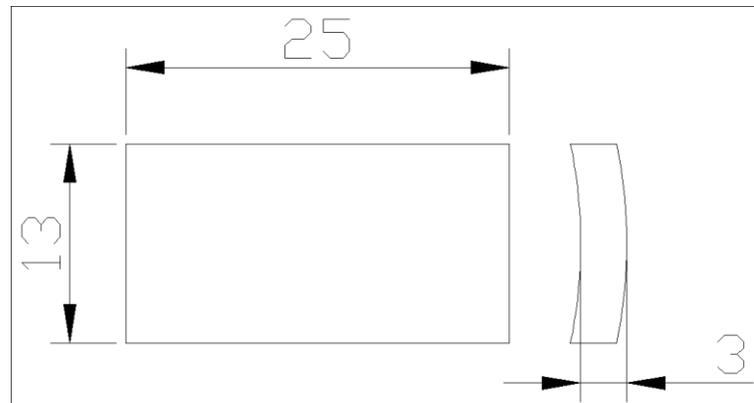
De cada tubo soldado para tracción se obtendrán doce (12) probetas, es decir, cuatro (4) por junta, es importante resaltar que se escogerán las zonas donde se observe mejor la soldadura. Lo que arroja un total de cuarenta y ocho (48) probetas soldadas de tracción, de las cuales dieciséis (16) estarán soldadas con corriente baja, dieciséis (16) estarán soldadas con corriente media y dieciséis (16) estarán soldadas con corriente alta.

Adicionalmente, de la sección de cada tubo (5 en total) destinada a estudios de caracterización se obtendrán tres (3) probetas, para un total de quince (15) probetas de tracción para caracterización.

#### 3.6.4. Elaboración de las probetas de dureza y metalografía.

Para las probetas de dureza y metalografía, sólo existía la restricción de que, como algunas serían sometidas a corrosión, era necesario que éstas fueran al menos piezas rectangulares de lados trece (13) milímetros por veinticinco (25) milímetros (figura 3.9). En este sentido, se obtendrán doce (12) probetas del tubo soldado para probetas de dureza y metalografía, es

decir, cuatro (4) por junta, es importante resaltar que se escogerán las zonas donde se observe mejor la soldadura.



**Figura 3.9. Dimensiones para las probetas de dureza y metalografía.**

Fuente: Propia

Las probetas con soldadura serán iguales a la mostrada en la figura 3.9, salvo que tendrá la unión o junta soldada transversalmente y en el medio de la misma.

Además, de la sección de cada tubo (5 en total) destinada a estudios de caracterización se obtendrán una (1) probeta, para un total de cinco (5) probetas de dureza y metalografía para caracterización. Se utilizará una tronzadora y una fresadora horizontal con disco de corte para cortar las probetas de los tubos. Además, luego de realizar los ensayos de corrosión, se deberán cortar en pequeñas secciones estas probetas, de manera de que sea posible embutirlas para su fácil manipulación.

### **3.7. Procedimientos Experimentales.**

#### **3.7.1. Ensayo de Corrosión.**

El ensayo de corrosión se llevará a cabo en una Cámara de Niebla Salina Estándar (figura 3.10), que se encuentra en el Laboratorio de

Materiales de la Universidad de Carabobo y cuyas características se muestran en la tabla 3.6.

**Tabla 3.6. Características de la Cámara de Niebla Salina Estándar.**

<b>Marca</b>	The GS Equipment
<b>Modelo</b>	0831 0010
<b>Año de fabricación</b>	1980
<b>Fecha de calibración</b>	16/04/2009

Fuente: Yépez y Affaqui (2009). Procedimiento para el funcionamiento de la Cámara de Niebla Salina, Escuela de Ingeniería Mecánica, Laboratorio de Materiales, Universidad de Carabobo.



**Figura 3.10. Máquina de Ensayo Universal en Materiales.**

Fuente: Propia

El ensayo se regirá según la norma ASTM designación **B 117- 07**.

#### 3.7.1.1. Preparación Superficial de la Muestra.

Idealmente se tiene que lograr que la superficie de la muestra sea igual a la superficie real, pero esto generalmente es difícil de lograr. Sin embargo las

muestras a ensayar deben prepararse previamente, lavando las probetas a ensayar para eliminar los óxidos y contaminantes depositados en éstas. Si la superficie de la muestra es muy rugosa o contiene mucha costra es necesario hacerle esmerilado o pulido con un alambre abrasivo basto, para luego hacerle pulido final. Todas estas operaciones deben realizarse evitando un excesivo calentamiento de la muestra.

#### 3.7.1.2. Mediciones y Pesaje de la Muestra.

Después de la preparación superficial, las muestras deben ser cuidadosamente pesadas (y registrar el peso de cada una) con una balanza de 1 g de apreciación. Si bien, con ésta máquina no es posible determinar la velocidad de corrosión (lo cual implica una mayor precisión en la medición de la masa; 0,1 mg de apreciación y un ensayo de otro tipo), la pérdida de masa ocasionada por la corrosión servirá para crear una idea cualitativa (no cuantitativa) de la resistencia a la corrosión del material en estudio, que servirá posteriormente para establecer conclusiones.

#### 3.7.1.3. Preparación de la Solución Salina.

La solución única que servirá como medio corrosivo en este ensayo deberá tener las siguientes características según la especificación ASTM B117- 07; debe ser preparada disolviendo  $5 \pm 1$  partes por unidad de masa de cloruro de sodio (NaCl) en 95 partes de agua (destilada o desmineralizada conformada según la especificación ASTM D1193). La sal utilizada debe ser cloruro de sodio sustancialmente libre de níquel, cobre y cualquier otro contaminante seco (menos de 0,3% de impurezas totales). El ph de la solución debe estar entre 6,5 y 7,2.

#### 3.7.1.4. Períodos de Exposición.

Cada probeta será expuesta durante un período de exposición determinado. En este trabajo se variará entre tres períodos de exposición; 48, 96 y 168 horas, según ejemplifica la norma ASTM B117- 07.

#### 3.7.1.5. Evaluación de la Corrosión.

Según la norma ASTM G50 – 76 la corrosión puede evaluarse mediante el cálculo de la velocidad de corrosión para lo cual se debe determinar la pérdida de masa. Sin embargo este método conlleva muchas desviaciones si la corrosión es localizada. Otra manera de evaluar la corrosión es de manera cualitativa, calculando el porcentaje de área afectada, localizando las picaduras y midiendo su profundidad, y realizando estudios de metalografía.

Sin embargo, cuando la pérdida de peso es baja, o la corrosión es altamente localizada, y en general, para tener un resultado cuantitativo, la norma ASTM G50 – 76 recomienda realizar ensayos de tracción a probetas no sometidas a corrosión y luego a probetas del mismo material sometido a ensayos de corrosión, con el fin de determinar las variaciones en el porcentaje de elongación y en el esfuerzo de tracción (esfuerzo máximo).

#### 3.7.2. *Ensayo de Tracción.*

El ensayo de tracción es el método más confiable para evaluar propiedades mecánicas de un material y a su vez lograr conocer las limitaciones del mismo a soportar esfuerzos ante cualquier uso o diseño al cual puede ser empleado.

Para reducir hechos fortuitos y errores sistemáticos, se deben realizar más de una probeta (en este trabajo se realizarán cuatro) por cada condición a evaluar, luego se toma el promedio de las propiedades determinadas para las probetas de las mismas características para que el valor sea más cercano a la realidad. Adicionalmente, las probetas que fallen fuera de la zona calibrada o fracturen en la soldadura (en el caso de las probetas soldadas) no serán tomadas en cuenta en los análisis, ya que se consideran no válidas.

### 3.7.2.1. Equipos utilizados.

- Máquina Universal de Ensayos Mecánicos (figura 3.11), Marca Galdabini, con capacidad máxima de 200.000 N (20 Ton) de carga y 200 mm/min de velocidad máxima.
- Sistema computarizado para recolección de data.



**Figura 3.11. Máquina Universal de Ensayos Mecánicos utilizada.**

- Mordazas de sujeción para probetas planas.
- Compresor de aire. Marca COMAIR, modelo MK-200, presión máxima 800 KPa.
- Vernier. Marca Mitutoyo, de apreciación 0,05 mm y rango de 0-300 mm.

### 3.7.2.2. Procedimiento del ensayo.

- Marcar y medir la longitud calibrada ( $L_0$ ) en cada probetas.
- Medir el ancho inicial ( $W_0$ ) de la sección reducida y el espesor ( $T_0$ ) para calcular el área transversal inicial ( $A_0$ ) de la sección reducida de la probeta utilizando la ecuación 3.1.

- Indicar los parámetros del ensayo en el software controlador del equipo.
- Velocidad del ensayo: 4 mm/min. Este valor se encuentra dentro del rango recomendado en la norma ASTM E 8M - 04 según la longitud de la sección reducida de las probetas de tracción (70 mm).
- Colocar la probeta entre las mordazas de la máquina de ensayos.
- Comenzar a aplicar la carga sobre la probeta hasta la rotura de la misma.
- Imprimir la gráfica correspondiente a fuerza vs. alargamiento para cada probeta.
- Tomar las medidas finales; la longitud final ( $L_f$ ), el espesor ( $T_f$ ) y el ancho final de la sección reducida ( $W_f$ ); en la zona donde falla el material.
- Con los dos parámetros obtenidos anteriormente ( $L_o$ ,  $L_f$ ,  $W_o$ ,  $W_f$ ), determinar el porcentaje de elongación, el área final, y el porcentaje de reducción de área, a través de las ecuaciones 3.3, 3.1 y 3.4 respectivamente.
- Determinar la curva esfuerzo ingenieril vs. deformación.

Para calcular el área (inicial y/o final, según los valores introducidos) se utilizará la ecuación 3.1 (obtenida de la norma ASTM E 8M - 04), debido a que la sección no es rectangular sino que tiene dos lados curvos.

$$A = \left[ \left( \frac{W}{4} \right) * (D^2 - W^2)^{1/2} \right] + \left[ \left( \frac{D^2}{4} \right) * \arcsen \left( \frac{W}{D} \right) \right] - \left[ \left( \frac{W}{4} \right) * ((D - 2T)^2 - W^2)^{1/2} \right] - \left[ \left( \frac{(D - 2T)^2}{2} \right) * \arcsen \left( \frac{W}{(D - 2T)} \right) \right] \quad (3.1)$$

Donde:

A: área transversal en la sección reducida (mm<sup>2</sup>).

W: ancho de la probeta en la sección reducida (mm).

D: diámetro exterior del tubo (mm).

T: espesor de la probeta en la sección reducida (mm).

Después del ensayo, se obtendrá carga o fuerza máxima con la cual se calculará el esfuerzo máximo utilizando el área inicial de la sección reducida y la ecuación 3.2 (obtenida de la norma ASTM E 8M - 04).

$$\sigma_{\max} = \frac{F_{\max}}{A_0} \quad (3.2)$$

Donde:

$\sigma_{\max}$ : Esfuerzo máximo (MPa).

$F_{\max}$ : fuerza o carga máxima (N).

$A_0$ : área transversal inicial en la sección reducida (mm<sup>2</sup>).

Para calcular el porcentaje de elongación se utilizará la ecuación 3.3 (obtenida de la norma ASTM E 8M - 04).

$$\% \Delta L = \left( \frac{L_f - L_o}{L_o} \right) \times 100\% \quad (3.3)$$

Donde:

$\% \Delta L$ : porcentaje de elongación (%).

$L_f$ : longitud final de la sección calibrada (mm).

$L_o$ : longitud inicial de la sección calibrada (mm).

Para calcular el porcentaje de reducción de área se utilizará la ecuación 3.4 (obtenida de la norma ASTM E 8M - 04).

$$\% \Delta A = \left( \frac{A_o - A_f}{A_o} \right) \times 100\% \quad (3.4)$$

Donde:

$\% \Delta A$ : porcentaje de reducción de área (%).

$A_o$ : área inicial de la sección calibrada ( $\text{mm}^2$ ).

$A_f$ : área final de la sección calibrada ( $\text{mm}^2$ ).

Con el ensayo de tensión se obtiene la información sobre las capacidades de esfuerzos sobre las juntas soldadas y de la ductilidad de la soldadura así como el diagrama esfuerzo vs. deformación, además se obtiene la data sobre el esfuerzo último, esfuerzo de fluencia, porcentaje de elongación, porcentaje de reducción de área.

### 3.7.3. *Ensayo de metalografía.*

El objetivo principal de la realización del ensayo metalográfico es revelar las microestructuras y constituyentes de los metales para así evaluar las propiedades del material de estudio. La realización de este ensayo esta descrito por la norma ASTM E3 - 01.

Las probetas realizadas para estudios de dureza y metalografía fueron cortadas en pedazos pequeños (menos de 10mm en el sentido de la soldadura y menos de 20 mm en el sentido perpendicular) de manera que fuese posible embutir las mismas. Al embutir, se presta atención a que la parte de estudio (la que se dejaba expuesta) era la zona transversal a la soldadura.

#### 3.7.3.1. Equipos y materiales utilizados.

- Máquina para embutir, Marca Buehler, modelo Simplimet II (figura 3.12 a).
- Baquelita negra.

- Máquina de desbaste/pulido Marca Buehler, modelo Ecomet II. (figura 3.12 b).
- Desbastadora de cinta, 1360 rpm.
- Lijas con tamaño de grano 80, 120, 240, 400, 500, 600, 1200.



(a)

(b)

**Figura 3.12. Equipos utilizados para la preparación de las probetas; (a) Embutidora, y (b) Máquina de desbaste / pulido.**

Fuente: Propia

- Lijas con tamaño de grano 80, 120, 240, 400, 500, 600, 1200.
- Pulidora Buehler para pulido grueso y fino.
- Paño de pulido grueso marca Buehler, modelo Billard, color verde
- Paño de pulido fino marca Buehler, modelo Microcloth, color marrón.
- Alúmina gruesa, marca Buehler, modelo Masterpolish
- Alúmina fina, marca Buehler, modelo Micropolish.
- Pinzas, etanol, guantes, secador para probetas.
- Reactivo empleado en Microscopía; Solución de Nital al 2%.
- Reactivo empleado en Macroscopía; Solución de Yodo al 10% en Ioduro de Potasio al 20%.

- Disco abrasivo para corte de probetas.
- Microscopio electrónico de barrido, marca Unión (figura 3.13).



**Figura 3.13. Microscopio electrónico.**

Fuente: Propia

### 3.7.3.2. Procedimiento del ensayo.

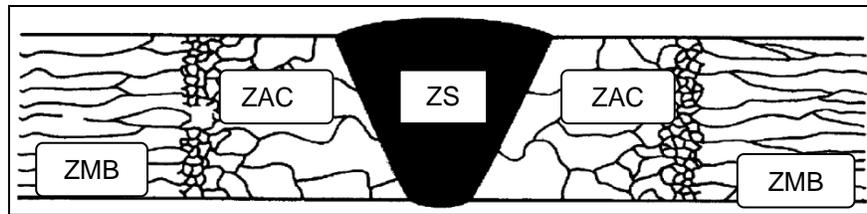
- Para los ensayos microscópicos, se embutieron todas las muestras utilizando la máquina para embutir y baquelita negra, con el fin de poder manipular mejor las muestras.
- Se realizó el desbaste grueso con la desbastadora de cintas, con cintas de lijas de grano 80, 120 y 240. Con esto se busca formar una superficie plana para el estudio.
- Se elaboró el desbaste fino con la máquina Ecomet II con lijas de sección circular de granos 400, 500, 600 y 1200.
- Se llevaron las muestras ya desbastadas al banco de pulido, en el mismo se realiza un pulido grueso y un pulido fino, con alúmina gruesa y fina respectivamente.

- Se realizó el ataque químico a las probetas para microscopía, este paso se efectúa atacando la superficie finamente pulida con una solución de Nital al 2%, por un período de 5 segundos, luego lavar con abundante agua y rociar con etanol para luego secarlas con aire.
- Análisis Macroscópico, se busca analizar toda la estructura y constituyentes que se generan después del proceso de soldadura en la zona de la soldadura, zona afectada por el calor y material base.
- Para los ensayos macroscópicos, se realizó desbaste grueso con lijas de granos 80, 120 y 240.
- Luego, para el desbaste fino se emplearon lijas de grano 400, 600 y 1200.
- Se realizó el ataque químico a las probetas para macroscopía, este paso se efectúa atacando la superficie finamente desbastada con una solución de Yodo al 10% en Ioduro de Potasio al 20%, por un período de 15 segundos, luego lavar con abundante agua y rociar con etanol para luego secarlas con aire.
- Análisis macroscópico, es el método empleado para medición de los parámetros más importantes de la soldadura como ancho del cordón, penetración, refuerzo para luego ser comparados y también la macroscópica nos sirve para poder ver si posee los tipos de discontinuidades como distorsión, porosidades, penetración incompleta, grietas, entre otras.

#### 3.7.4. Ensayo de Microdureza.

El ensayo de microdureza permite revelar las variaciones de resistencia a la deformación del material dentro de zonas muy específicas, tales como: la zona de la soldadura, la zona afectada por el calor y particularidades del material base, tal precisión no es posible con ensayos de dureza.

Las zonas específicas a estudiar son la zona de la soldadura (ZS), la zona afectada por el calor (ZAC) y el material base (ZMB) (Ver figura 3.14).



**Figura 3.14. Zonas originadas luego del proceso de soldadura.**

Fuente: Rodríguez (2001). MANUAL DE SOLDADURA, Soldadura Eléctrica, MIG y TIG, 1era edición, Librería y Editorial ALSINA.

#### 3.7.4.1. Equipos utilizados.

- Microdurómetro marca Buehler, modelo Indemet 1104.



**Figura 3.15. Microdurómetro utilizado en los ensayos.**

Fuente: Propia

#### 3.7.4.2. Procedimiento del ensayo.

- Encender el microdurómetro Buehler.

- Colocar la muestra preparada en la prensa.
- Tomar la referencia base de las líneas de ajuste para medición de diagonales y marcar el origen de medición.
- Ajustar la vista de aumento entre las dos opciones disponibles 10x o 40x en zona en el cual se tomará la medición.
- Ubicar la zona donde se realizará la indentación.
- Seleccionar el indentador para efectuar el ensayo.
- Obtener y registrar las medidas de las diagonales de la huella con ayuda de las líneas de referencia.
- Registrar el valor de dureza Vickers (HV) resultante.
- Repetir hasta obtener todos los valores de microdureza que se requieran.
- Realizar el procedimiento para cada muestra a evaluar.

#### *3.7.5. Análisis de los Datos Obtenidos.*

Los datos obtenidos como resultado de los ensayos antes expuestos se deberán analizar, por separado y estableciendo comparaciones entre las probetas expuestas y las no expuestas a la corrosión, con el fin de determinar la variación de las variables de trabajo (propiedades mecánicas) entre las muestras ensayadas.

Se establecerá como patrón de comparación las muestras ensayadas que no se someterán a la corrosión y que serán soldadas bajo los mismos parámetros. Se concluirá al respecto.

# CAPÍTULO 4

## *Resultados y Análisis de Resultados*

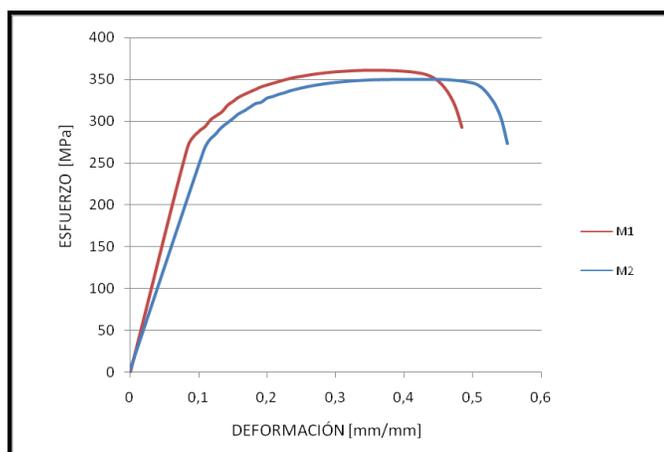
---

### 4.1. Caracterización del metal base.

Para la caracterización del material es necesario analizar cada uno de los tubos que se escogieron para la realización del estudio de corrosión en soldadura. La finalidad de caracterizar todos los tubos a utilizar es garantizar que todos los tubos correspondan al mismo material y a la misma colada.

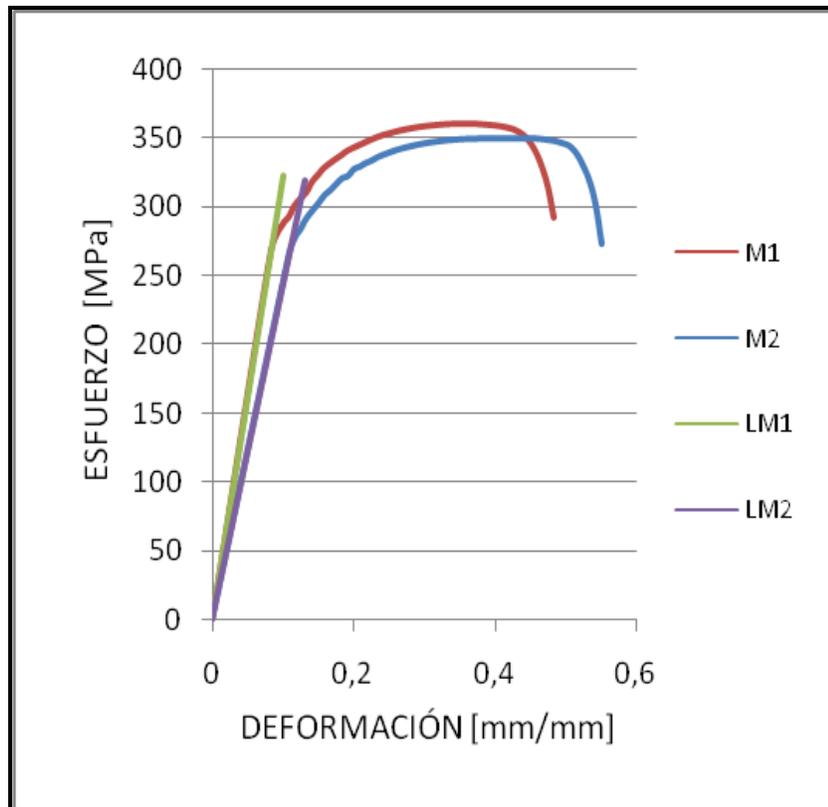
#### 4.1.1. Ensayos de tracción.

Una vez culminado el ensayo de tracción se procede a calcular los esfuerzos y las deformaciones con la finalidad de obtener las gráficas esfuerzo-deformación ingenieril que se muestran en la figura 4.1.



**Figura 4.1. Gráfica de esfuerzo-deformación ingenieril de dos probetas para la caracterización.**

Con la gráfica de esfuerzo-deformación ingenieril se procede al cálculo de las propiedades mecánicas que se pueden obtener a partir del ensayo de tracción comenzando por la relación de la Ley de Hooke, aplicando la conversión del 0,2% de la deformación. En la figura 4.2 podemos apreciar las líneas de las cuales se extrae el Esfuerzo de Fluencia (Y).



**Figura 4.2. Gráfica de esfuerzo-deformación ingenieril con líneas de la relación de la Ley de Hooke.**

A continuación se muestran los valores promedios correspondientes a las propiedades mecánicas del material, obtenidas a través de la gráfica anterior (ver tabla 4.1). Para la caracterización del resto de los tubos se procedió de igual manera que en el tubo anterior, para así poder obtener sus propiedades mecánicas.

Cabe destacar que para la obtención del Módulo de Elasticidad es necesario utilizar un extensómetro, por lo que no se puede calcular esta propiedad directamente de las gráficas obtenidas ya que es fundamental medir la deformación directamente del material para poder obtener el valor real del Módulo de Elasticidad. Es por esta razón que esta propiedad no se encuentra entre las propiedades mecánicas obtenidas para el estudio. [Martínez y Azuaga, 1997]

**Tabla 4.1. Propiedades mecánicas del primer tubo.**

Propiedades Mecánicas	Promedio	Desviación Estándar
<b>Esfuerzo de Fluencia (Y) [MPa]</b>	268	2,07
<b>Esfuerzo máximo [MPa]</b>	356	7,62
<b>%RA</b>	64	0,42
<b>%E</b>	35	2,47
<b>Esfuerzo de Ruptura [MPa]</b>	297	6,11

En la tabla 4.2 se pueden apreciar las propiedades mecánicas obtenidas para el resto de los tubos utilizados.

**Tabla 4.2. Propiedades mecánicas para el resto de los tubos.**

Propiedades Mecánicas	Valores			
	2do Tubo	3er Tubo	4to Tubo	5to Tubo
<b>Esfuerzo de Fluencia (Y) [MPa]</b>	236	251	208,60	275
<b>Esfuerzo máximo [MPa]</b>	369	349	346	376
<b>%RA</b>	71	77	70	71
<b>%E</b>	33	39	35	40
<b>Esfuerzo de Ruptura [MPa]</b>	300	288	302	315

Una vez realizados todos los ensayos de tracción para caracterizar el material se procede a realizar un promedio de las propiedades mecánicas obtenidas las cuales se aprecian en la tabla 4.3.

**Tabla 4.3. Valores promedio de las propiedades mecánicas del material.**

Propiedades Mecánicas	Promedio	Desviación Estándar
<b>Esfuerzo de Fluencia (Y) [MPa]</b>	248	26,62
<b>Esfuerzo máximo [MPa]</b>	359	12,76
<b>%RA</b>	70	4,43
<b>%E (en 60mm)</b>	36	2,90
<b>Esfuerzo de Ruptura [MPa]</b>	300	9,82

Al comparar las propiedades mecánicas del material obtenidas de la norma ASTM A 178 con las propiedades mecánicas calculadas a partir de los resultados obtenidos de los ensayos de tracción, se corroboró que el material utilizado se trata de un acero al carbono ASTM A178 grado A, el cual posee en promedio una ductilidad media de aproximadamente un 36% de porcentaje de elongación.

#### 4.1.2. *Ensayos de dureza.*

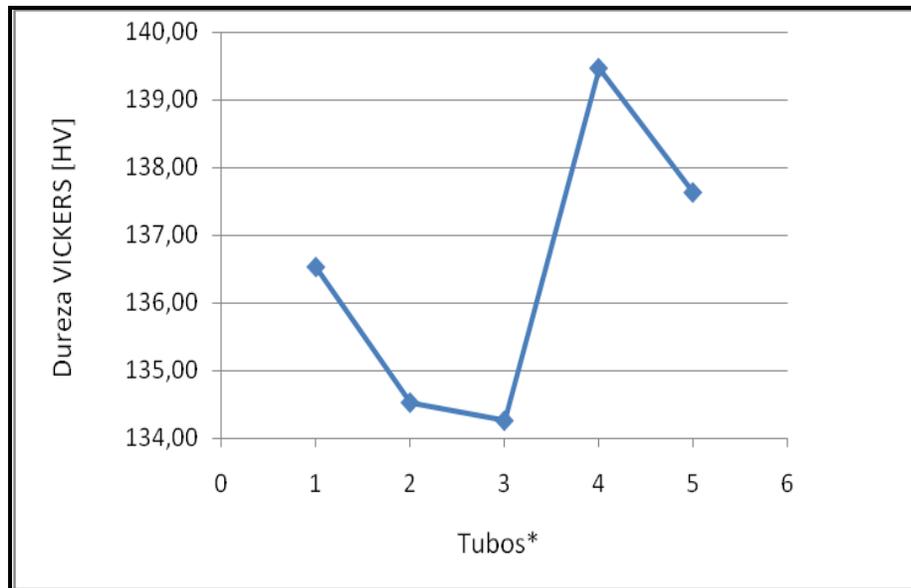
A continuación se muestran las tablas de los datos obtenidos a través del ensayo de microdureza VICKERS aplicado a cada uno de los tubos para la caracterización del material: (ver tabla 4.4).

En la figura 4.3 se muestra la gráfica de los valores promedios de cada uno de los tubos a ensayar. Al calcular el valor promedio total (de todos los tubos) de dureza VICKERS resulta 137 HV, lo cual refleja una diferencia máxima del 3,7% entre los valores promedio de cada tubo. Esta diferencia puede deberse a que al realizar el tratamiento térmico en el material durante

la fabricación de los tubos hubo zonas que se enfriaron más rápido que otras, lo que conlleva a un endurecimiento mayor de estas zonas.

**Tabla 4.4. Pruebas de dureza de los tubos.**

Prueba	1er Tubo [Kgf/mm <sup>2</sup> ]	2do Tubo [Kgf/mm <sup>2</sup> ]	3er Tubo [Kgf/mm <sup>2</sup> ]	4to Tubo [Kgf/mm <sup>2</sup> ]	5to Tubo [Kgf/mm <sup>2</sup> ]
<b>1</b>	128	139	136	138	140
<b>2</b>	143	131	135	137	129
<b>3</b>	139	134	132	143	144
<b>Promedio</b>	137	135	134	140	138
<b>Desviación Estándar</b>	7,56	4,03	2,18	2,85	7,56



**Figura 4.3. Gráfica de microdureza de cada tubo.**

\*El orden de los tubos de la gráfica es igual al orden de descripción anteriormente expuesto.

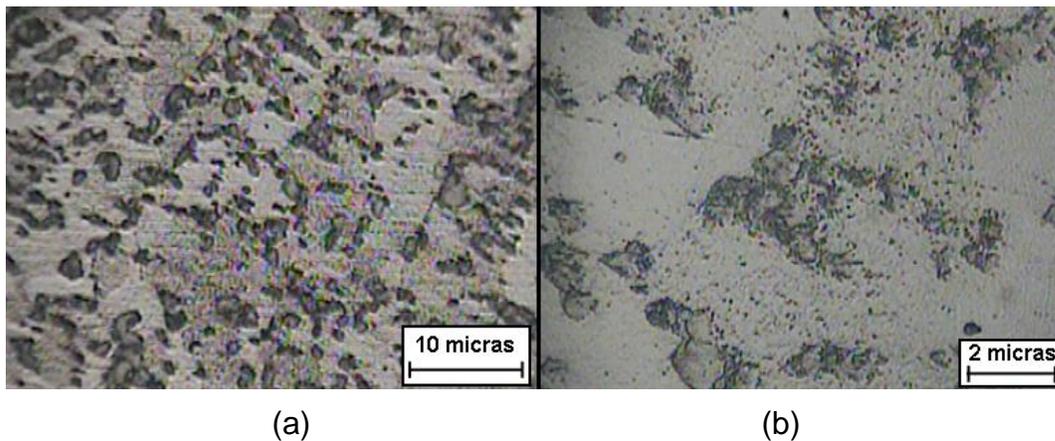
#### 4.1.3. Ensayos de metalografía.

En la microestructura de los aceros se puede observar la presencia de colonias de perlita (ferrita + cementita) en matrices de ferrita. La

microestructura esta constituida aproximadamente por un 80% de ferrita libre y por un 20% aproximadamente de perlita (formada por la trasformacion de la austenita a la temperatura de austenización). La ferrita puede observarse claramente en las áreas de luz y la estructura perlítica se aprecia en las zonas oscuras. En las figuras 4.4, 4.5, 4.6, 4,7 y 4.8 se observa la microestructura de todos los tubos en dos aumentos que son 100X y 400X, la cual resultó similar en todos los casos a la suministrada por el “ASM Metals HANDBOOK”, Volumen 9, Metalografía y Microestructura (figura 4.9).

Ésta microestructura es típica de los aceros de bajo carbono que han sido sometidos a un tratamiento térmico (por encima de 900°C en este caso) y luego enfriado lo suficientemente lento y controlado para permitir que la austenita se desconponga en una mezcla de ferrita y cementita a temperatura ambiente.

En la figura 4.9 se puede observar la Microestructura del material ASTM 178 grado A, proporcionada por el “ASM Metals HANDBOOK”, Volumen 9, Metalografía y Microestructura.



**Figura 4.4. Microscopía del primer tubo; (a) Aumento de 100X, (b) Aumento de 400X.**

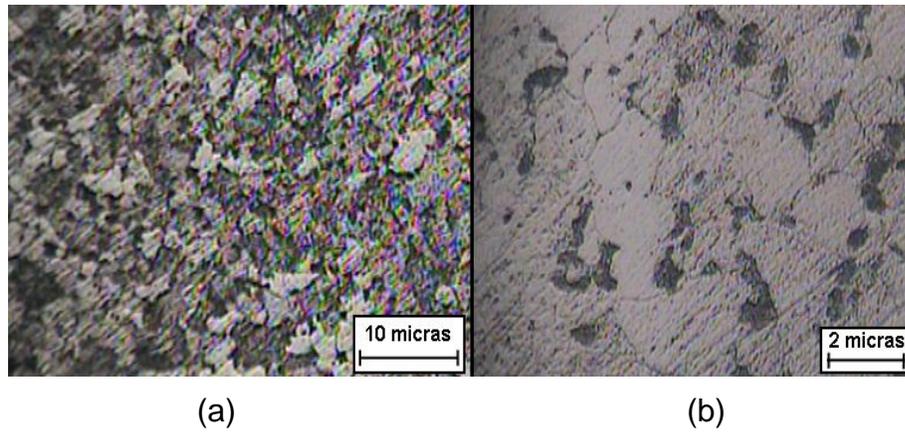


Figura 4.5. Microscopía del segundo tubo; (a) Aumento de 100X, (b) Aumento de 400X.

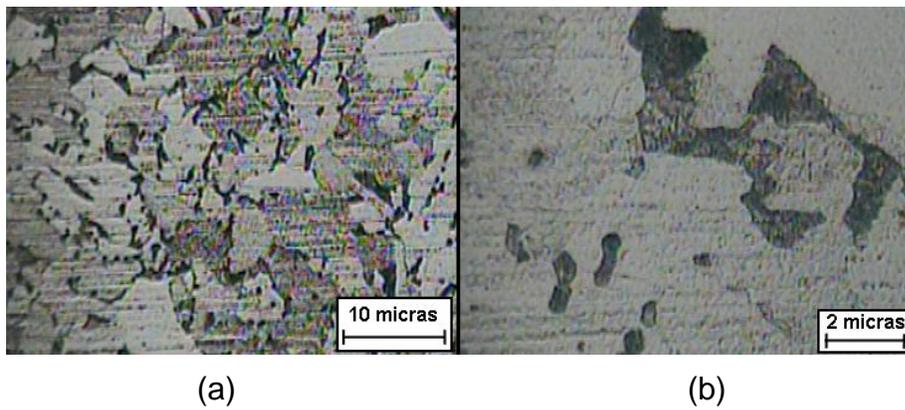


Figura 4.6. Microscopía del tercer tubo; (a) Aumento de 100X, (b) Aumento de 400X.

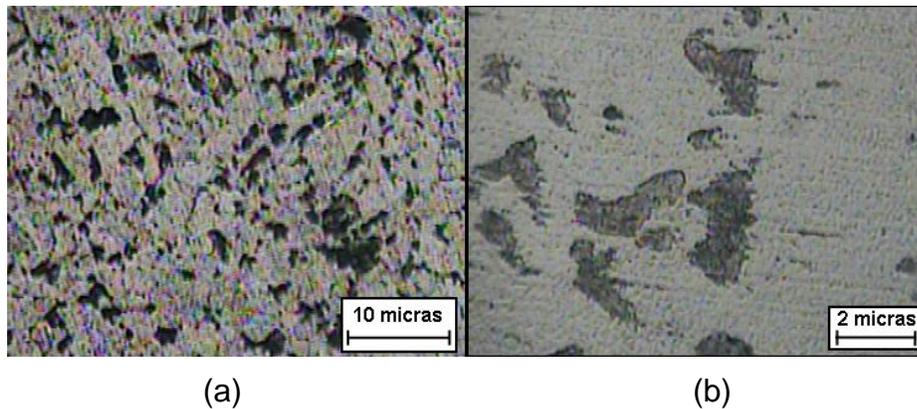


Figura 4.7. Microscopía del cuarto tubo; (a) Aumento de 100X, (b) Aumento de 400X.

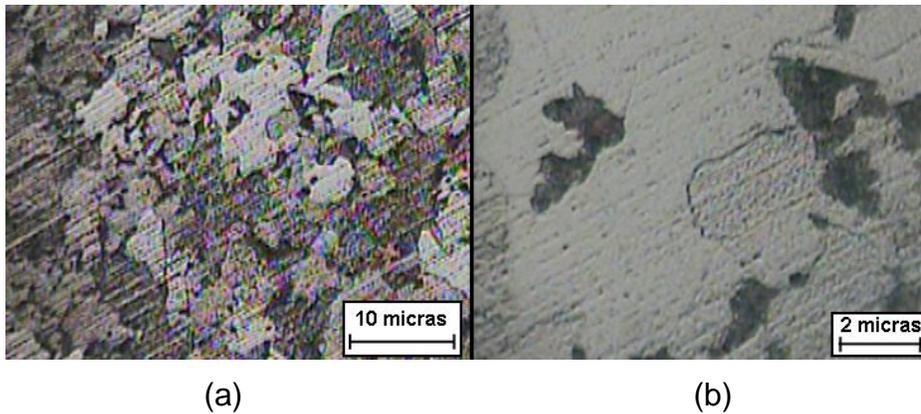


Figura 4.8. Microscopía del quinto tubo; (a) Aumento de 100X, (b) Aumento de 400X.



Figura 4.9. Microscopia a 500X del acero ASTM A178.

Fuente: Metalografía y Microestructura. ASM Metals HANDBOOK, Volumen 9.

## 4.2. Caracterización del material soldado.

De manera similar a la caracterización de cada uno de los tubos del material en estudio, se realizó la caracterización del material soldado con el fin de obtener una referencia con la cual comparar las propiedades del material sometido a ensayos de corrosión.

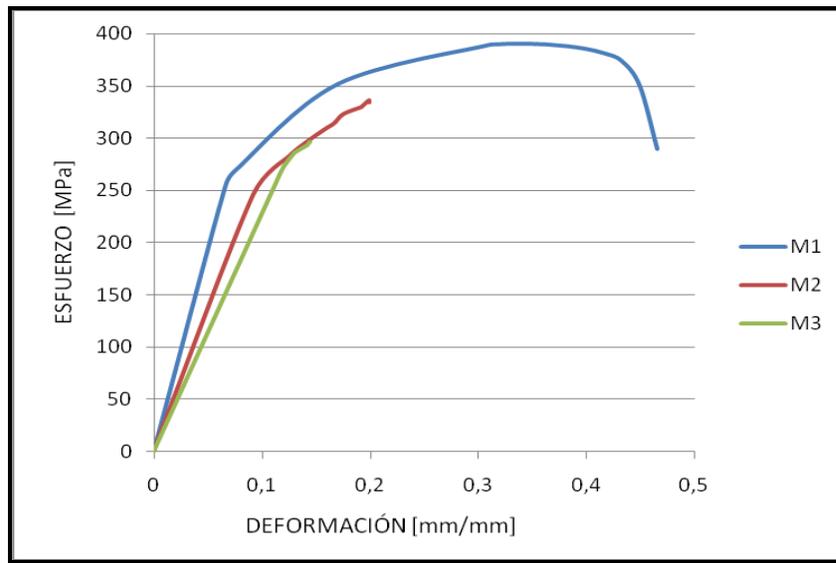
### 4.2.1. Ensayos de tracción.

Para obtener las características mecánicas a partir del ensayo de tracción se realizaron tres pruebas por cada intensidad de corriente de

soldadura utilizada; intensidad baja (60-70 A), intensidad media (70-80 A) e intensidad alta (80-90 A).

#### 4.2.1.1. Probetas soldadas con intensidad de corriente baja.

Resultados del ensayo de tracción (ver figura 4.10).



**Figura 4.10. Ensayos de tracción de las probetas soldadas con intensidad de corriente baja.**

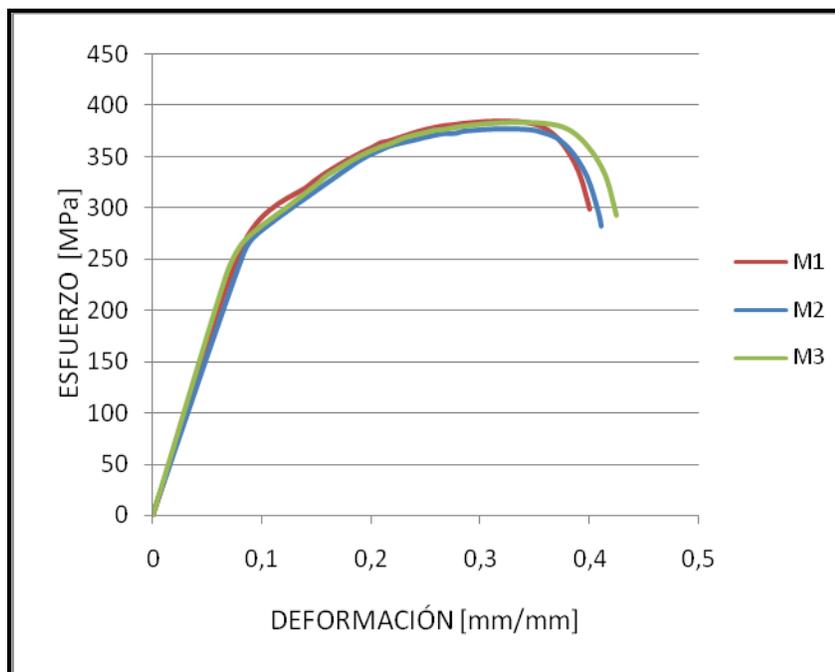
Como se puede observar en la figura 4.10 existe una diferencia entre el comportamiento de las probetas, esto se debe a que dos de ellas fallaron en la soldadura luego de haber pasado la zona elástica, esto se debe a la falta de penetración en la sección de unión de las piezas y por esto el área de la sección transversal es mucho menor que en el resto de la longitud calibrada esto trae como consecuencia la presencia de un concentrador de esfuerzos originando el fenómeno conocido como inestabilidad plástica, la cual es responsable de la propagación de una fisura dando así origen a una fractura dúctil rápida. Sin embargo se logró obtener algunas características en base a la primera probeta, en la tabla 4.5 se muestran los resultados obtenidos para este ensayo, así como también el promedio del Esfuerzo de Fluencia ( $Y$ ).

**Tabla 4.5. Propiedades mecánicas de las probetas soldadas con intensidad de corriente baja.**

Propiedades Mecánica	M1	M2	M3	Promedio	Desviación Estándar
Esfuerzo de Fluencia (Y) [MPa]	255	246	267	255	10,54
%RA	65	--	--	65	--
%E	25	--	--	25	--
Esfuerzo máximo [MPa]	390	336	297	390	46,88
Esfuerzo de Ruptura [MPa]	350	336	297	350	27,58

#### 4.2.1.2. Probetas soldadas con intensidad de corriente media.

Resultados del ensayo de tracción: (ver figura 4.11)



**Figura 4.11. Ensayos de tracción de las probetas soldadas con intensidad de corriente media.**

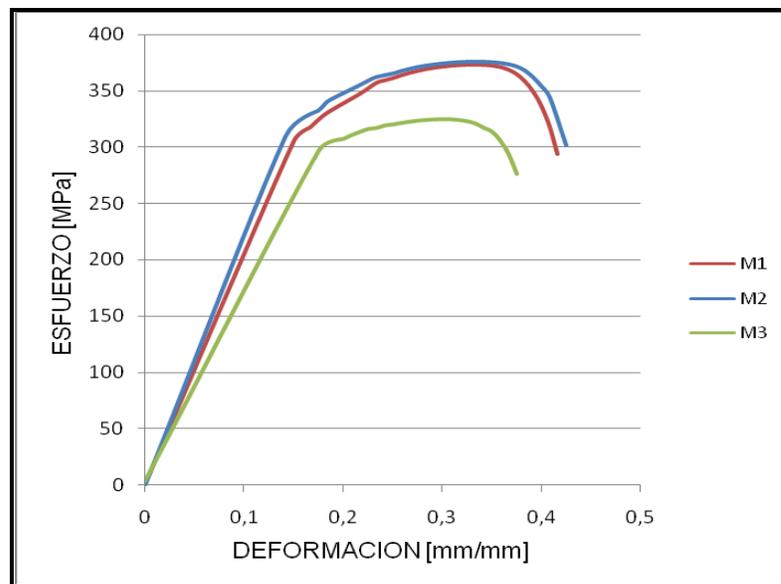
En la tabla 4.6 se pueden observar los valores de las propiedades obtenidas a partir de este ensayo.

**Tabla 4.6. Propiedades mecánicas probetas soldadas con intensidad de corriente media.**

Propiedades Mecánicas	M1	M2	M3	Promedio	Desviación Estándar
Esfuerzo de Fluencia (Y) [MPa]	266	257	233	252	17,06
%RA	73	76	69	73	3,26
%E	34	24	26	28	5,31
Esfuerzo máximo [MPa]	385	378	384	382	3,81
Esfuerzo de Ruptura [MPa]	330	325	345	333	10,78

4.2.1.3. Probetas soldadas con intensidad de corriente alta.

Resultados del ensayo de tracción (ver figura 4.12).



**Figura 4.12. Ensayos de tracción de las probetas soldadas con intensidad de corriente alta.**

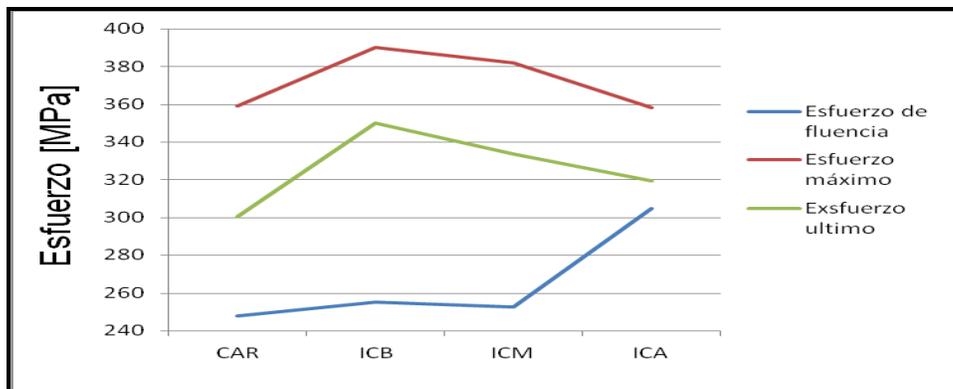
En la tabla 4.7 se pueden observar los valores de las propiedades obtenidas a partir de este ensayo.

**Tabla 4.7. Propiedades mecánicas de las probetas soldadas con intensidad de corriente alta.**

Propiedades Mecánicas	M1	M2	M3	Promedio	Desviación Estándar
Esfuerzo de Fluencia (Y) [MPa]	306	310	297	304	6,61
%RA	75	70	71	72	2,33
%E	22	22	26	24	1,94
Esfuerzo máximo [MPa]	374	376	325	358	28,91
Esfuerzo de Ruptura [MPa]	338	344	276	319	37,57

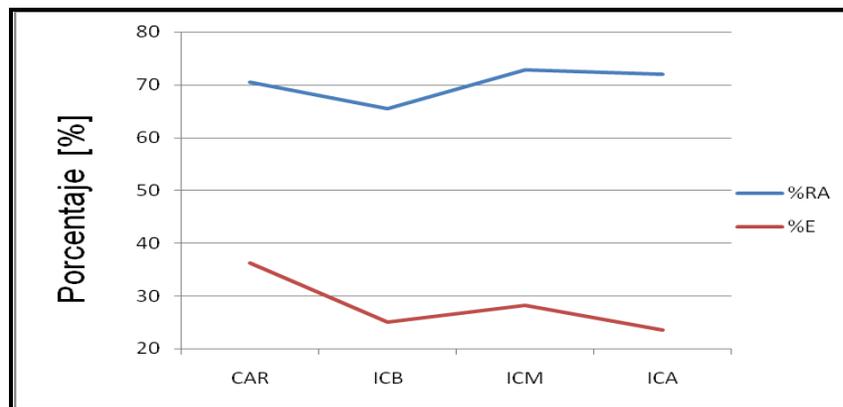
#### 4.2.1.4. Análisis de los ensayos de tracción.

En las figuras 4.13, 4.14 se muestran las gráficas de comparación de los resultados obtenidos entre la caracterización del material y la caracterización del material soldado.



**Figura 4.13. Gráfica de comparación de esfuerzos obtenidos a través del ensayo de tracción.**

\* Significado de valores del eje X: CAR: valores de caracterización; ICB: Valores de material soldado con intensidad de corriente baja; ICM: Valores de material soldado con intensidad de corriente media; ICA: Valores de material soldado con intensidad de corriente alta.



**Figura 4.14 Gráfica de comparación de porcentajes de reducción de área y de porcentaje de elongación obtenidos a través del ensayo de tracción.**

Al hacer una comparación con las propiedades de caracterización se puede observar en las gráficas:

- El esfuerzo de fluencia que más aumentó con respecto al de caracterización fue el de las probetas de intensidad de corriente alta.
- Tanto el esfuerzo máximo como el esfuerzo último disminuyó a medida que aumentaba la intensidad de corriente de la soldadura.

Estas variaciones en el porcentaje de elongación conllevan a una reducción en la ductilidad del material y se deben a que durante el enfriamiento brusco de la soldadura se evita el equilibrio de la reacción eutectoide; por ende la austenita se transforma en martensita (fase de no equilibrio) la cual es una fase dura y frágil. Por lo tanto se generó una zona en la que ocurre poca deformación. Debido a la dureza de la martensita se requieren esfuerzos mayores que los de tensión que soporta el material para que ocurra la fractura en la soldadura.

#### 4.2.2. Ensayos de Dureza.

A continuación se muestran los resultados obtenidos a través del ensayo de microdureza VICKERS a cada uno de las muestras soldadas bajo las tres

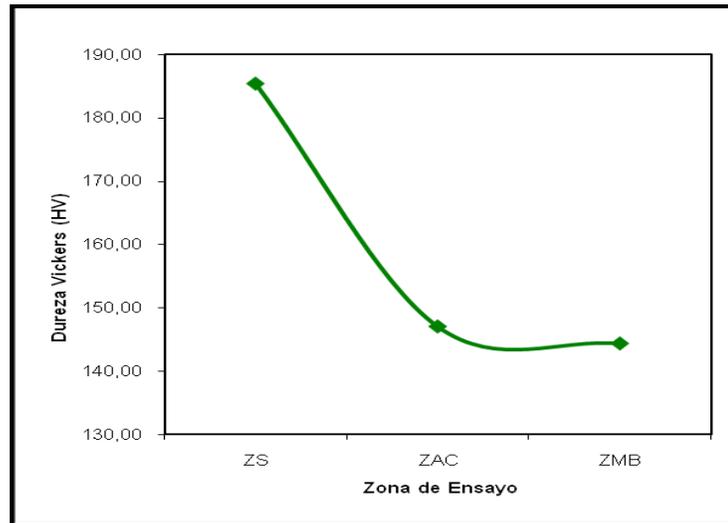
intensidades de corriente diferentes (ver tablas 4.8; 4.9; 4.10), donde ZS es la zona de la soldadura, ZAC es la zona afectada por el calor y ZMB es la zona de material base.

**Tabla 4.8. Resultados de pruebas de dureza para muestra soldada con intensidad de corriente baja.**

<b>Prueba</b>	<b>ZS [Kgf/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>ZAC [Kgf/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>ZMB [Kgf/mm<sup>2</sup>]</b>
<b>1</b>	176,6	134,7	141,1
<b>2</b>	178,9	149,2	146,3
<b>3</b>	198,7	151,8	142,7
<b>4</b>	165,2	152,2	150,9
<b>5</b>	194,2	146,3	138,8
<b>6</b>	198,7	148	146,3
<b>Promedio</b>	185,4	147,0	144,4
<b>Desviación Estándar</b>	13,85	6,45	4,35

En la figura 4.15 se presenta la grafica de los valores promedios de la prueba de Dureza realizada al material en cada zona de estudio, donde se observa la disminución de la dureza de la muestra a medida que se aleja de la soldadura; la dureza promedio de la soldadura es 28,4% mayor que en el material base, esto se debe a que durante el proceso de soldadura el material se funde para lograr la unión permanente y al enfriarse se forma una martensita resultando la zona de la soldadura más dura que el resto del material. En cuanto a los valores obtenidos de dureza en la zona afectada por el calor (ZAC) y los obtenidos en la zona del material base (ZMB) puede

decirse que son similares; siendo el valor de la dureza en el material base 1,8% menor al de la zona afectada por el calor, esto puede deberse a que no se logró la penetración suficiente por lo tanto el calor generado en el proceso afecta muy poco la zona cercana a la soldadura.

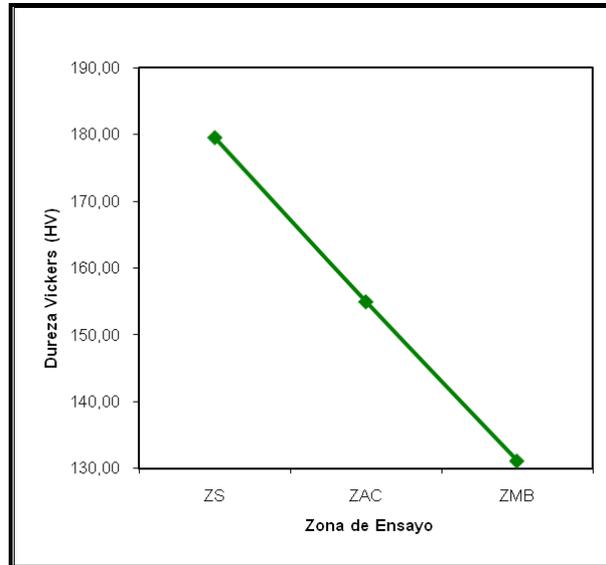


**Figura 4.15. Gráfica de microdureza de muestra soldada con intensidad de corriente baja.**

**Tabla 4.9. Resultados de pruebas de dureza para muestra soldada con intensidad de corriente media.**

Prueba	ZS [Kgf/mm <sup>2</sup> ]	ZAC [Kgf/mm <sup>2</sup> ]	ZMB [Kgf/mm <sup>2</sup> ]
1	178,9	157,6	128,8
2	175,6	138,1	129,4
3	193,6	149,7	132,9
4	171,8	158,5	136,6
5	192,3	161,4	123,8
6	165,2	164,7	135,5
<b>Promedio</b>	179,6	155,0	131,2
<b>Desviación Estándar</b>	11,33	9,67	4,78

En la figura 4.16 se presenta la gráfica de los valores promedios de la prueba de dureza realizada al material en cada zona de estudio.



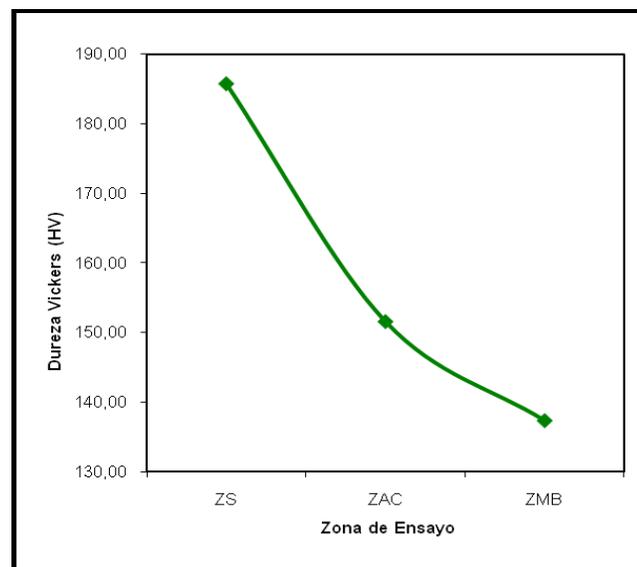
**Figura 4.16. Gráfica de microdureza de muestra soldada con intensidad de corriente media.**

**Tabla 4.10. Resultados de pruebas de dureza para muestra soldada con intensidad de corriente alta.**

Prueba	ZS [Kgf/mm <sup>2</sup> ]	ZAC [Kgf/mm <sup>2</sup> ]	ZMB [Kgf/mm <sup>2</sup> ]
1	185,1	161,8	130,1
2	186,3	150,9	145,1
3	189,9	155,8	140
4	180	148,8	132,9
5	180,5	143,1	136,2
6	192,3	148,8	139,6
<b>Promedio</b>	185,7	151,5	137,3
<b>Desviación Estándar</b>	4,93	6,48	5,40

Como se puede observar en la figura 4.16, de manera similar a la muestra anterior, el comportamiento de la dureza en el material disminuye a medida que se aleja de la zona de la soldadura (ZS), en este caso existen más de 40HV de diferencia entre la zona soldada y la zona del material base (ZMB). Además, se nota que el comportamiento de esta variación sigue una tendencia lineal, a diferencia del resto de las muestras (soldadas con intensidad baja y media).

En la figura 4.17 se presenta la gráfica de los valores promedios de la prueba de dureza realizada al material en cada zona de estudio, donde se observa, al igual que en las pruebas de dureza anteriores, que los valores de dureza disminuyen a medida que se aleja de la zona de la soldadura (ZS).



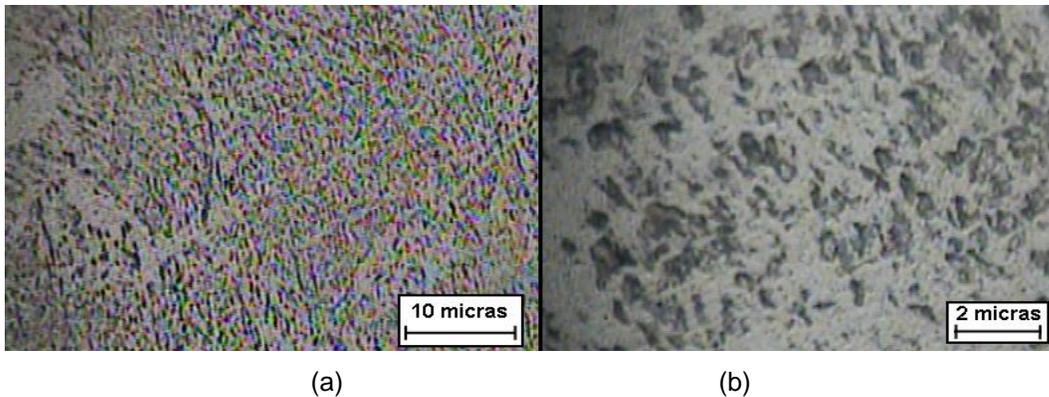
**Figura 4.17. Gráfica de microdureza de muestra soldada con intensidad de corriente alta.**

Al comparar las tablas 4.8, 4.9 y 4.10 se aprecia que en las probetas soldadas con intensidad de corriente media y alta es más notable la tendencia decreciente de la dureza a medida que se aleja de la zona de la soldadura. Como se puede observar en todas las gráficas poseen una tendencia

decreciente a medida que se aleja de la zona de la soldadura esto es un comportamiento típico de un material soldado ya que representa una de las garantías donde una pieza soldada fallará primero en el material base antes de fallar en la soldadura, ya que esta áreas requiere ser sometida a mayores esfuerzos a los que puede soportar el material base

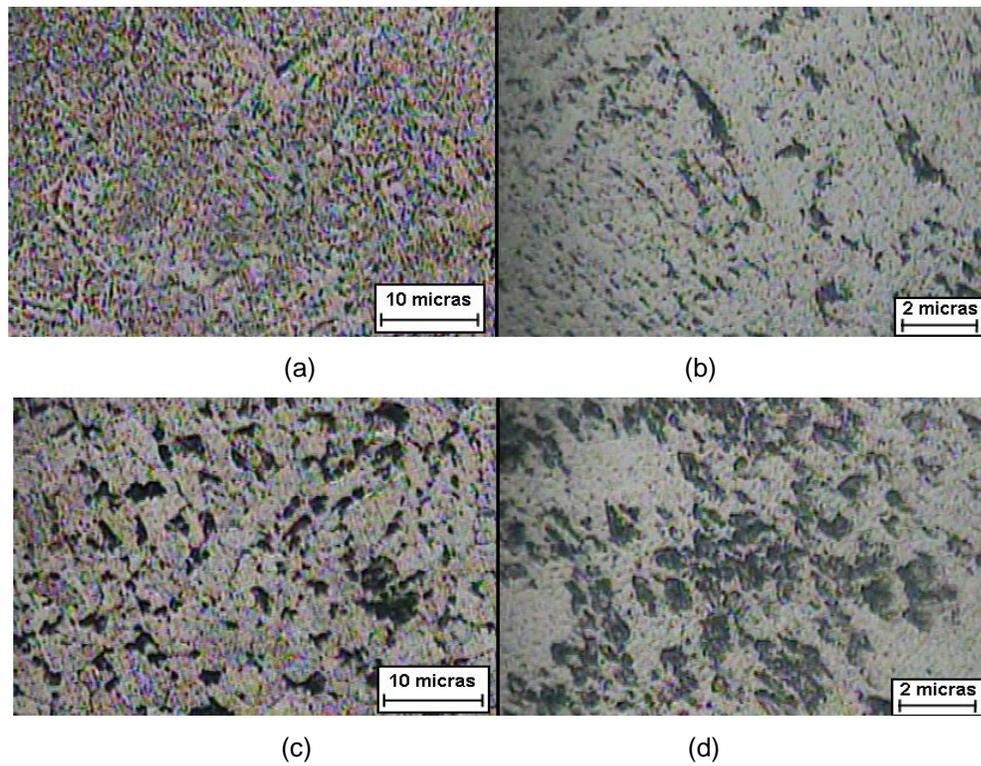
#### 4.2.3. Ensayos de Metalografía.

En las figuras 4.18, 4.19 y 4.20 se puede observar la microestructura de las muestras soldadas.

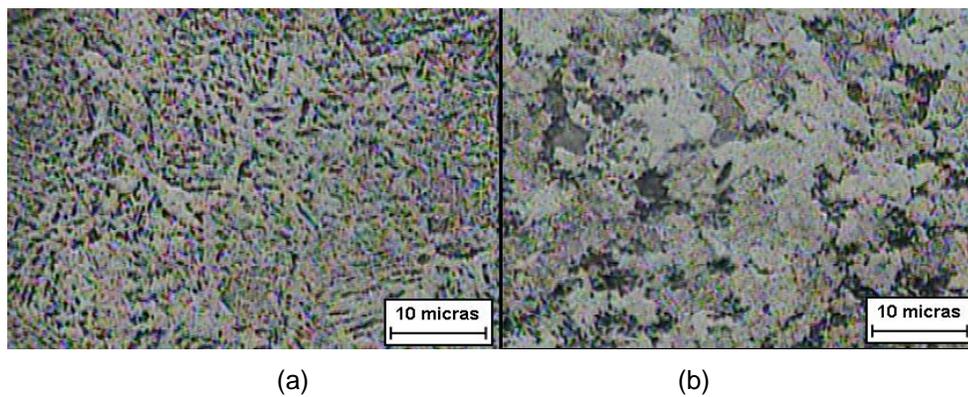


**Figura 4.18. Microscopía de la muestra soldada con intensidad de corriente baja; (a) Zona de la Soldadura a 100X; y (b) Zona del Material Base a 400X.**

Al comparar la figura 4.18 a con la figura 4.18 b, es notable la diferencia entre la forma de grano de la zona soldada con la del material base (lejos de la soldadura); en la primera se notan granos pequeños, próximos y alargados, típicos de una morfología dendrítica de la martensita, mientras que en la segunda se muestran granos un poco más grandes; colonias de perlita en matriz ferrítica. Este comportamiento se observó en el resto de las muestras en las que se compararon las zona de la soldadura con la zona del material base (figuras 4.19 y 4.20).



**Figura 4.19. Microscopía de la muestra soldada con intensidad de corriente media; (a) Zona de la Soldadura a 100X, (b) Zona de la Soldadura a 400X, (c) Zona del Material Base a 100X, (d) Zona del Material Base a 400X.**



**Figura 4.20. Micorscopía de la muestra Soldada son intensidad de corriente alta: (a) Zona de la Soldadura a 100X, (b) Zona Afectada por el Calor a 100X.**

Durante el proceso de soldadura el material se calentó a una temperatura elevada, alrededor de 3000°C, para poder superar el grado de

fusión del material, permitiendo así la unión permanente de las piezas al solidificarse. Sin embargo, las condiciones de enfriamiento del material desde ésta alta temperatura hasta la temperatura ambiente, generaron un enfriamiento brusco y rápido que evitó el equilibrio de la reacción eutectoide, de esta manera la austenita se transformó en una fase de no equilibrio llamada martensita en la zona donde se alcanzó alta temperatura. La martensita es una fase dura y frágil que dá al acero su capacidad única de endurecerse a valores muy altos.

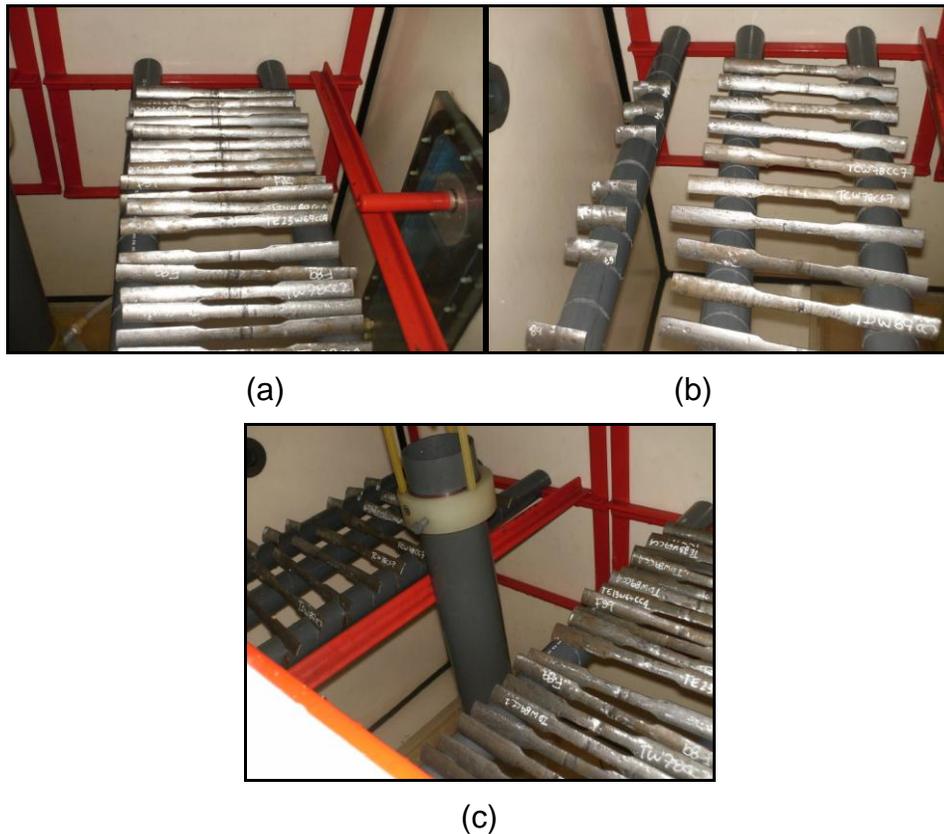
### **4.3. Ensayos de Corrosión.**

Las probetas para el ensayo de corrosión fueron preparadas (ver capítulo 3, sección 3.7.1.1.) y pesadas antes de ser introducidas en la cámara de corrosión como se observa en la figura 4.21.



**Figura 4.21. Pesaje de una probeta antes de ser sometida a corrosión.**

En la figura 4.22 se muestra la disposición de las probetas dentro de la cámara de corrosión (Cámara de Niebla Salina Estándar, Laboratorio de Materiales – Universidad de Carabobo).



**Figura 4.22. Disposición de las probetas en la Cámara de Niebla Salina Estándar Laboratorio de Materiales - Universidad de Carabobo.**

En la figura 4.23 se puede observar el resultado del Ensayo de Corrosión para las probetas cuyo periodo de exposición fue de siete (7) días, donde se observan las probetas una vez expuestas a la corrosión durante un período de siete (7) días, que al compararlas con las probetas antes de ser expuestas a la corrosión de nota el deterioro de la superficie producto del ambiente corrosivo al que fueron sometidas en la cámara de corrosión de niebla salina. Se observa corrosión localizada en algunas áreas de la cara de las probetas que se encontraba en contacto directo con el rocío salino; posiblemente debido a la acumulación (no escurrimiento) de solución en la superficie.



**Figura 4.23. Resultado de las muestras expuestas a corrosión durante siete (7) días.**

No se muestran imágenes de las probetas sometidas a periodos de dos (2) y cuatro (4) días debido a que en ellas no es apreciable el nivel de deterioro tanto como en las probetas sometidas al medio corrosivo durante siete (7) días.

#### **4.3.1. Pérdida de peso en las probetas de tracción.**

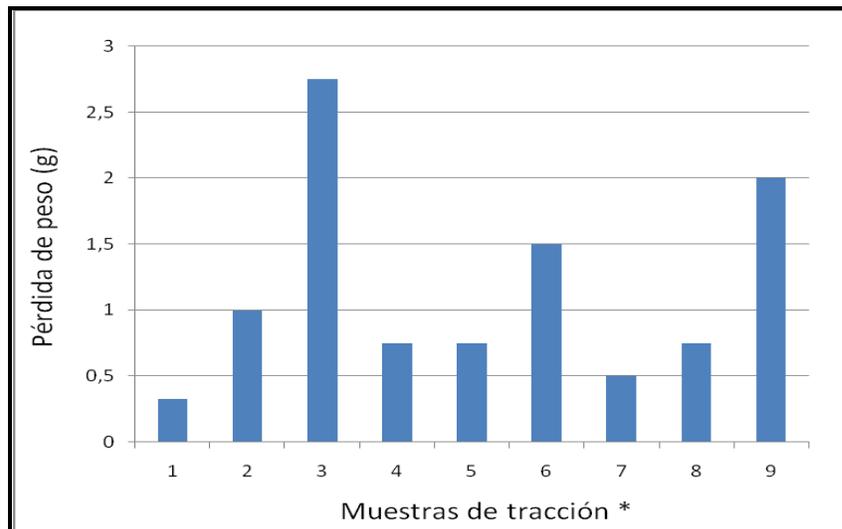
En la tabla 4.11 se puede apreciar el promedio de la pérdida de peso de las muestras sometidas a corrosión, según intensidad de corriente de soldadura y días de exposición a la corrosión. Así como también en la figura 4.24 se muestra gráficamente los valores expresados en dicha tabla.

Como se puede observar de la tabla 4.11 y la figura 4.24, la pérdida de peso promedio en las probetas de tracción aumentó a medida que aumentaba el tiempo de exposición a la corrosión en todos los casos; obteniendo así la mayor pérdida de peso para las probetas expuestas a corrosión durante siete (7) días. Esto se debe a que a medida que aumenta el tiempo de exposición

de un material a un medio corrosivo aumenta el deterioro ocasionado por dicho medio.

**Tabla 4.11. Pérdida de peso en las probetas de tracción.**

Intensidad de corriente	Días de exposición a la corrosión	Promedio de pérdida de peso (g)	Desviación Estándar
<b>Baja (60-70 A)</b>	2	0,33	0,57
	4	1,00	0,82
	7	2,75	0,96
<b>Media (70-80 A)</b>	2	0,75	0,5
	4	0,75	0,5
	7	1,50	0,57
<b>Alta (80-90 A)</b>	2	0,50	0,57
	4	0,75	0,5
	7	2,00	1,15



**Figura 4.24. Pérdida de peso de las muestras para tracción.**

\*Las muestras se encuentran en el mismo orden de la tabla 4.11.

Debido a que en las muestras para metalografía y dureza las pérdidas de peso son muy pequeñas y debido a que la balanza de pesaje tenía un (1)

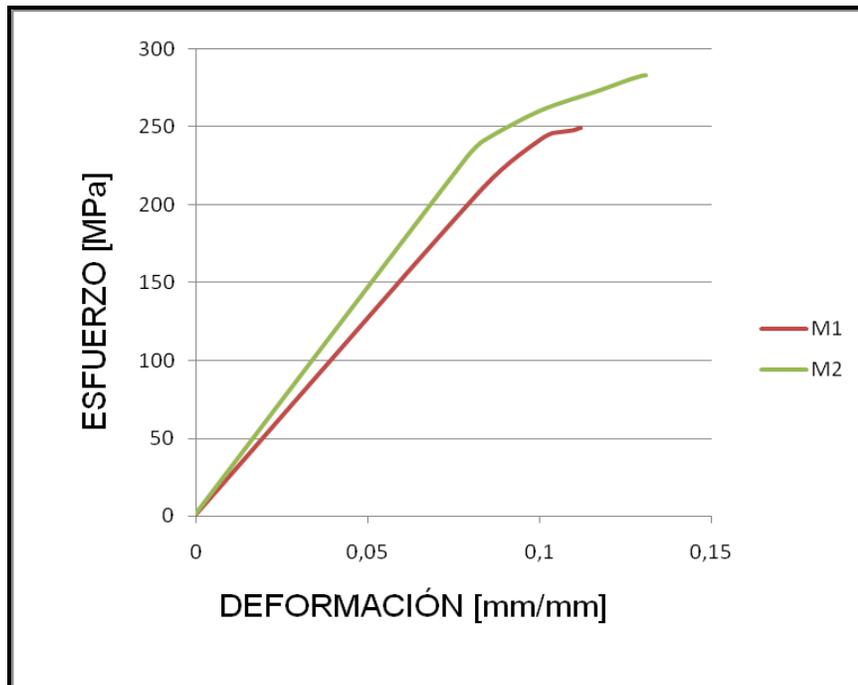
gramo de apreciación la pérdida de peso en estas muestras son despreciables.

#### 4.4. Ensayos de Tracción.

##### 4.4.1. Probetas soldadas con intensidad de corriente baja.

##### 4.4.1.1. Periodo de exposición de dos días.

En la figura 4.25 se puede apreciar el comportamiento obtenido del ensayo de tracción realizado a las probetas bajo dicha condición.



**Figura 4.25. Ensayos de tracción de las probetas soldadas con intensidad de corriente baja sometidas a corrosión durante dos (2) días.**

En la tabla 4.12 se muestran las propiedades obtenidas, una vez culminado el ensayo de tracción, para cada una de las muestras ensayadas así como también se muestra el promedio de dicha propiedades.

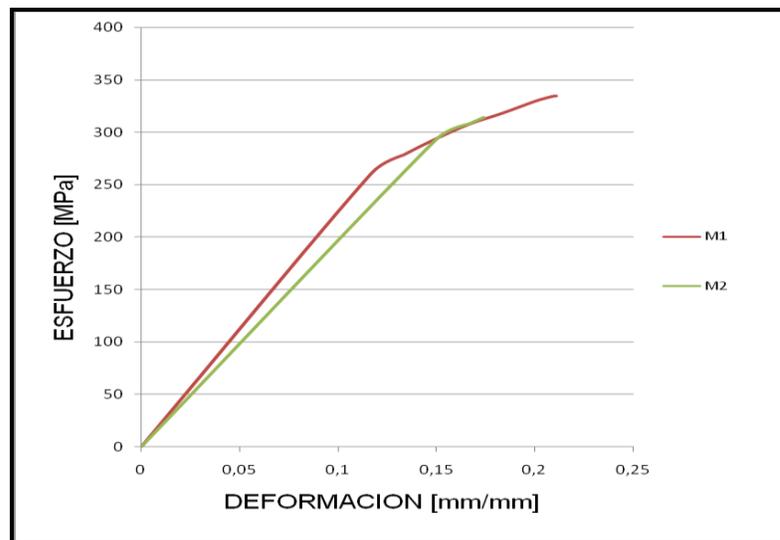
**Tabla 4.12. Propiedades mecánicas de las probetas de tracción soldadas con intensidad de corriente baja sometidas a corrosión durante dos (2) días.**

Propiedades Mecánica	M1	M2	Promedio
Esfuerzo de Fluencia (Y) [MPa]	211	231	221
Esfuerzo máximo [MPa]	249	283	266

Como se puede observar en la figura 4.25 todas las probetas ensayadas fallaron en la soldadura obteniendo así valores bajos de las propiedades analizadas con respecto a las propiedades promedio de los obtenidos en la caracterización de las muestras soldadas (ver tabla 4.5), producto de la mala fusión en la soldadura.

4.4.1.2. Periodo de exposición de cuatro días.

En la figura 4.26 se observa el comportamiento de las probetas bajo esta condición, y a su vez en la tabla 4.13 se presenta las propiedades mecánicas obtenidas a partir de este ensayo.



**Figura 4.26. Ensayos de tracción de las probetas soldadas con intensidad de corriente baja sometidas a corrosión durante cuatro (4) días.**

En la figura 4.26 se puede apreciar que, al igual que las probetas de período de exposición de dos (2) días, todas fallaron en la soldadura, sin embargo al compara las propiedades obtenidas en los dos períodos de exposición (ver tabla 4.13 y 4.14), es notable el aumento en el esfuerzo de fluencia y en el esfuerzo máximo alcanzado de 31,7% y 24,8% respectivamente, pero disminuyó el modulo de elasticidad en un 8,5% en esta última condición, esto puede deberse a que la corrosión puede volver más frágil al material.

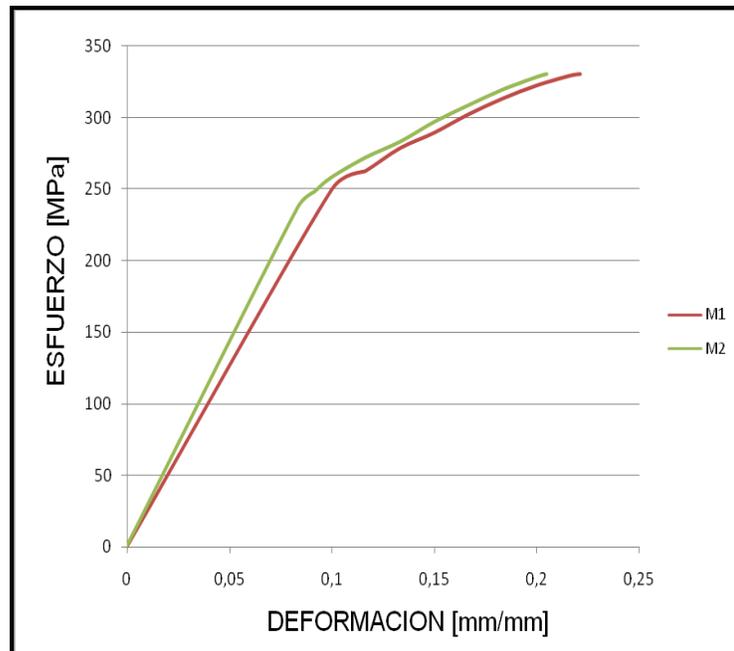
**Tabla 4.13. Propiedades mecánicas de las probetas de tracción soldadas con intensidad de corriente baja sometidas a corrosión durante cuatro (4) días.**

<b>Propiedades Mecánica</b>	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>Promedio</b>
<b>Esfuerzo de Fluencia (Y) [MPa]</b>	261	294	278
<b>Esfuerzo máximo [MPa]</b>	335	314	325

#### 4.4.1.3. Periodo de exposición de siete (7) días.

En la figura 4.27 se muestra la curva esfuerzo-deformación ingenieril, y así como también se muestra en la tabla 4.14 las propiedades mecánicas obtenidas a partir de este ensayo.

Al observar la figura 4.30 se percibe que todas las probetas ensayadas fallaron en la soldadura, obteniendo con este ensayo el menor de los esfuerzos de fluencia entre las probetas de los tres diferentes períodos de exposición.



**Figura 4.27. Ensayos de tracción de las probetas soldadas con intensidad de corriente baja sometidas a corrosión durante siete (7) días.**

**Tabla 4.14. Propiedades mecánicas de las probetas de tracción soldadas con intensidad de corriente baja sometidas a corrosión durante siete (7) días.**

Propiedades Mecánica	M1	M2	Promedio
<b>Esfuerzo de Fluencia (Y) [MPa]</b>	250,42	237,68	244,05
<b>Esfuerzo máximo [MPa]</b>	330,72	330,63	330,67

4.4.1.4. Análisis de los ensayos de tracción.

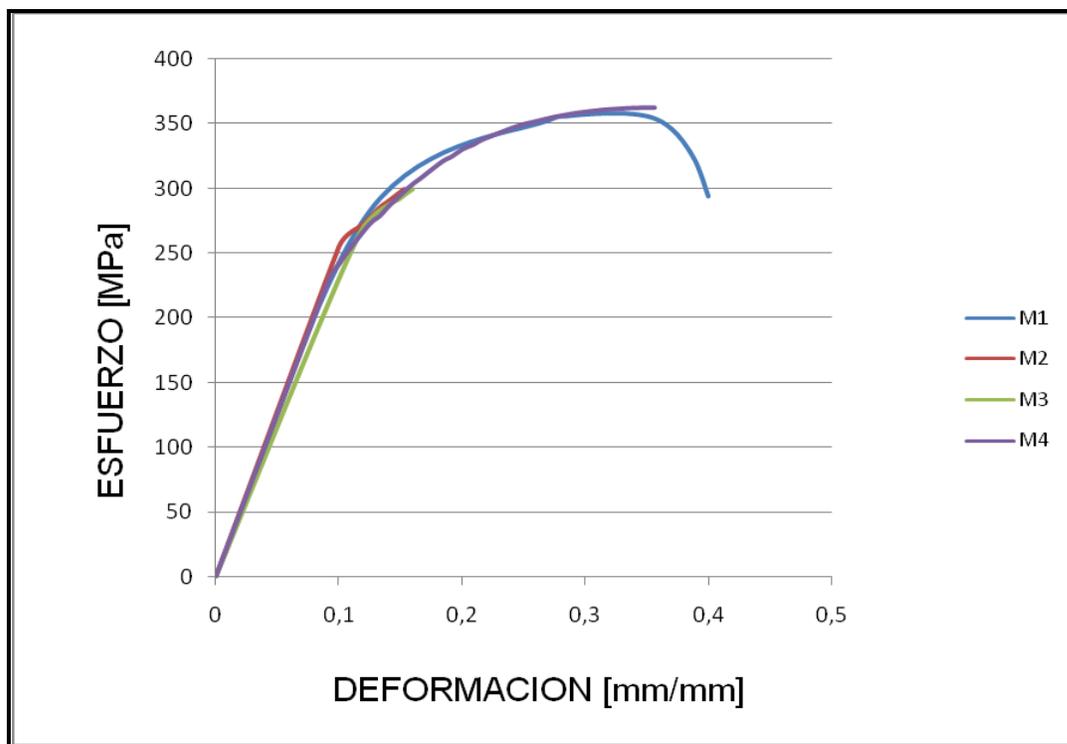
Debido a que todas las probetas fallaron en la soldadura se debe realizar un análisis macroscópico a esta soldadura para buscar las causas que originaron esta falla (ver sección 4.7).

4.4.2. **Probetas soldadas con intensidad de corriente media.**

4.4.2.1. Período de exposición de dos días.

En la figura 4.28 se puede apreciar las curvas esfuerzo-deformación ingenieril, luego en la tabla 4.15 se muestran las propiedades mecánicas calculadas a partir de este ensayo.

Como se puede observar tanto en la gráfica 4.28 como en la tabla 4.15, tres de las probetas ensayadas fallaron en la soldadura. Sin embargo al establecer comparaciones entre la probeta, con la cual se obtuvo un comportamiento deseado, con las probetas de caracterización de soldadura para intensidad de corriente media se observa que todas las propiedades disminuyeron en alguna magnitud menos el esfuerzo de fluencia, el cual aumentó 12,3%. Esto puede deberse a la presencia de oxido en las probetas ensayadas.



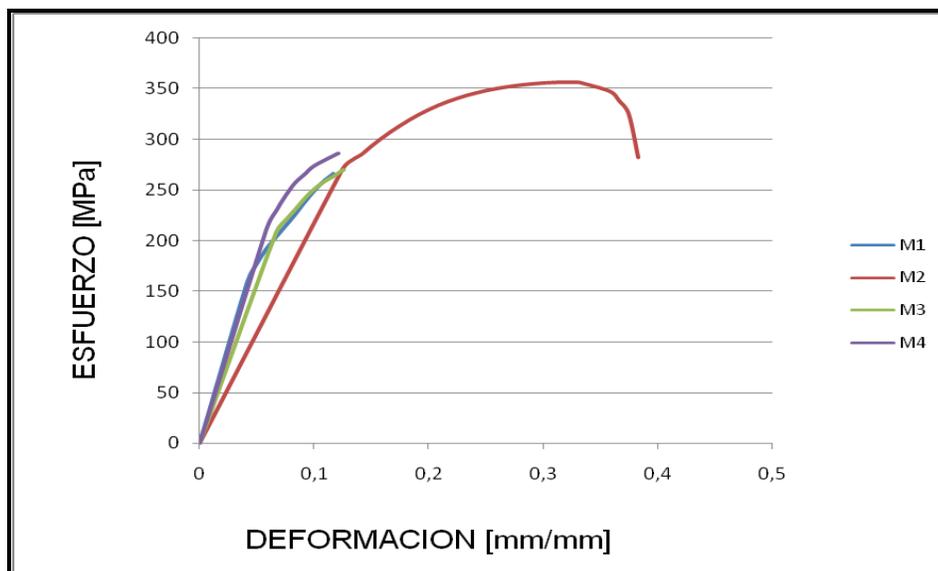
**Figura 4.28. Ensayos de tracción de las probetas soldadas con intensidad de corriente media sometidas a corrosión durante dos (2) días.**

**Tabla 4.15. Propiedades mecánicas de las probetas de tracción soldadas con intensidad de corriente media sometidas a corrosión durante dos (2) días.**

Propiedades Mecánicas	M1	M2	M3	M4	Promedio	Desviación Estándar
<b>Esfuerzo de Fluencia (Y) [MPa]</b>	283,30	255,06	265,44	230,18	283	22,19
<b>%RA</b>	62,36	-	-	-	62	-
<b>%E</b>	25,50	-	-	-	26	-
<b>Esfuerzo máximo [MPa]</b>	358,33	299,38	299,82	362,53	358	35,16
<b>Esfuerzo de Ruptura</b>	316,93	299,38	299,82	362,53	316	29,72

4.4.2.2. Período de exposición de cuatro días.

En la figura 4.29 se puede apreciar las curvas esfuerzo-deformación ingenieril, luego en la tabla 4.16 se encuentran las propiedades mecánicas calculadas a partir de este ensayo.



**Figura 4.29. Ensayos de tracción de las probetas soldadas con intensidad de corriente media sometidas a corrosión durante cuatro (4) días.**

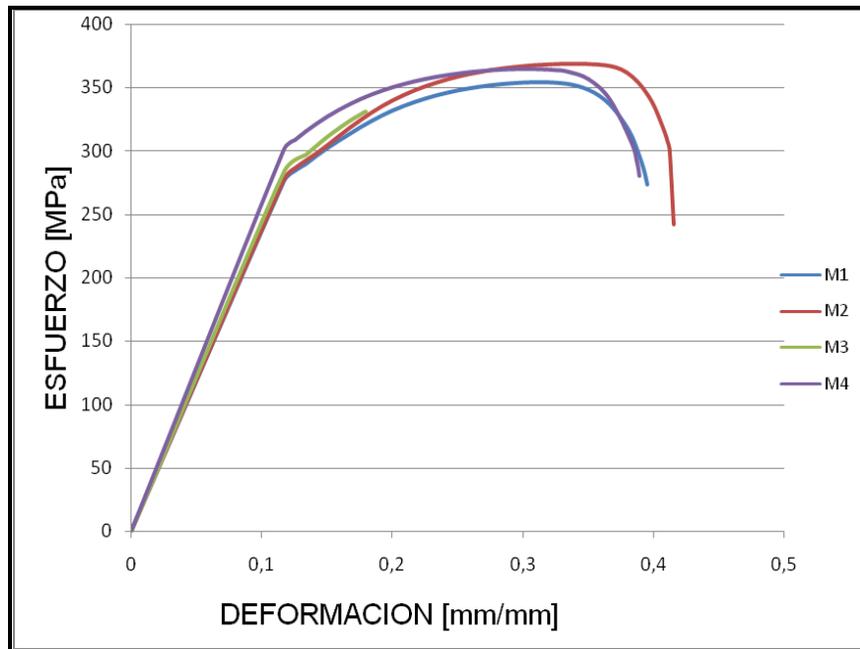
Como se puede apreciar tanto en la grafica 4.29 como en la tabla 4.16, solo una de las probetas ensayadas no falló en la soldadura. Sin embargo, al establecer comparaciones entre dicha probeta, con las probetas de caracterización de soldadura para intensidad de corriente media se observa un comportamiento similar al caso anterior; que todas las propiedades disminuyeron en alguna magnitud menos el esfuerzo de fluencia.

**Tabla 4.16. Propiedades mecánicas de las probetas de tracción soldadas con intensidad de corriente media sometidas a corrosión durante cuatro (4) días.**

<b>Propiedades Mecánicas</b>	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>M4</b>	<b>Promedio</b>	<b>Desviación Estándar</b>
<b>Esfuerzo de Fluencia (Y) [MPa]</b>	159,42	271,79	208,30	212,48	272	46,00
<b>%RA</b>	-	58,63	-	-	59	-
<b>%E</b>	-	22,25	-	-	22	-
<b>Esfuerzo máximo [MPa]</b>	266,03	356,71	270,04	286,42	357	42,21
<b>Esfuerzo de Ruptura</b>	266,03	325,25	270,04	286,42	325	27,02

#### 4.4.2.3. Período de exposición de siete días.

En la figura 4.30 se presentan las curvas esfuerzo-deformación ingenieril, luego en la tabla 4.17 se encuentran las propiedades mecánicas calculadas a partir de este ensayo.



**Figura 4.30. Ensayos de tracción de las probetas soldadas con intensidad de corriente media sometidas a corrosión durante siete (7) días.**

Como se puede apreciar tanto en la grafica 4.30 como en la tabla 4.17, solo una de las probetas ensayadas falló en la soldadura. Al establecer comparaciones entre este ensayo y el ensayo de caracterización de soldadura para intensidad de corriente media se observa un comportamiento similar al caso anterior; todas las propiedades disminuyen en alguna magnitud menos el esfuerzo de fluencia. Esto se debe a la presencia de oxido en las probetas ensayadas

**Tabla 4.17. Propiedades mecánicas de las probetas de tracción soldadas con intensidad de corriente media sometidas a corrosión durante siete (7) días.**

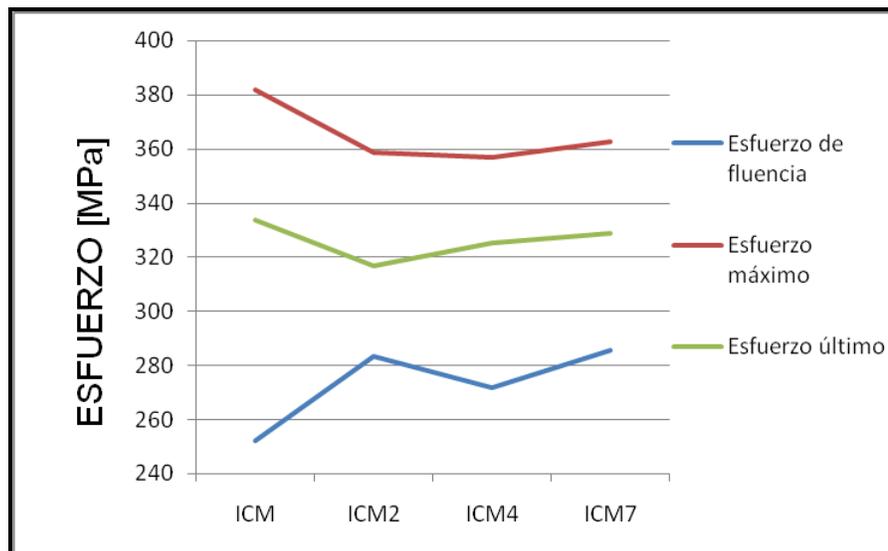
Propiedades Mecánicas	M1	M2	M3	M4	Promedio	Desviación Estándar
<b>Esfuerzo de Fluencia (Y) [MPa]</b>	277	278	284	302	286	11,43
<b>%RA</b>	60	63	-	69	64	4,78

%E	25	20	-	23	23	2,27
<b>Esfuerzo máximo [MPa]</b>	354	369	331	365	363	16,83
<b>Esfuerzo de Ruptura [MPa]</b>	311	335	331	340	329	12,54

#### 4.4.2.4. Análisis de los ensayos de tracción.

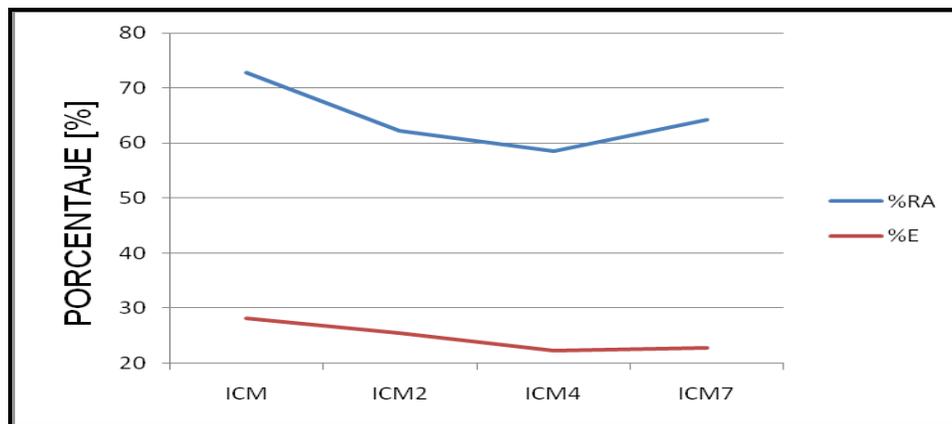
Como se pudo apreciar en las graficas 4.28, 4.29 y 4.30 gran parte de las probetas sometidas a tracción fallaron en la soldadura para saber la razón que originó esta falla se requiere de la realización de un análisis macroscópico (ver sección 4.7)

En la figura 4.31 y 4.32 se muestran las graficas de comparación de los resultados obtenidos entre la caracterización del material y la caracterización del material soldado.



**Figura 4.31. Gráfica de comparación de esfuerzos obtenidos a través del ensayo de tracción.**

\* Significado de valores del eje X: ICM: Valores de material soldado con intensidad de corriente media; ICM2: Valores de material soldado con intensidad de corriente media sometido a corrosión durante 2 días; ICM4: Valores de material soldado con intensidad de corriente media sometido a corrosión durante 4 días; ICM7: Valores de material soldado con intensidad de corriente media sometido a corrosión durante 7 días.



**Figura 4.32. Gráfica de comparación de porcentajes de reducción de área y de porcentaje de elongación obtenidos a través del ensayo de tracción.**

Al observar las gráficas mostradas anteriormente se puede decir que:

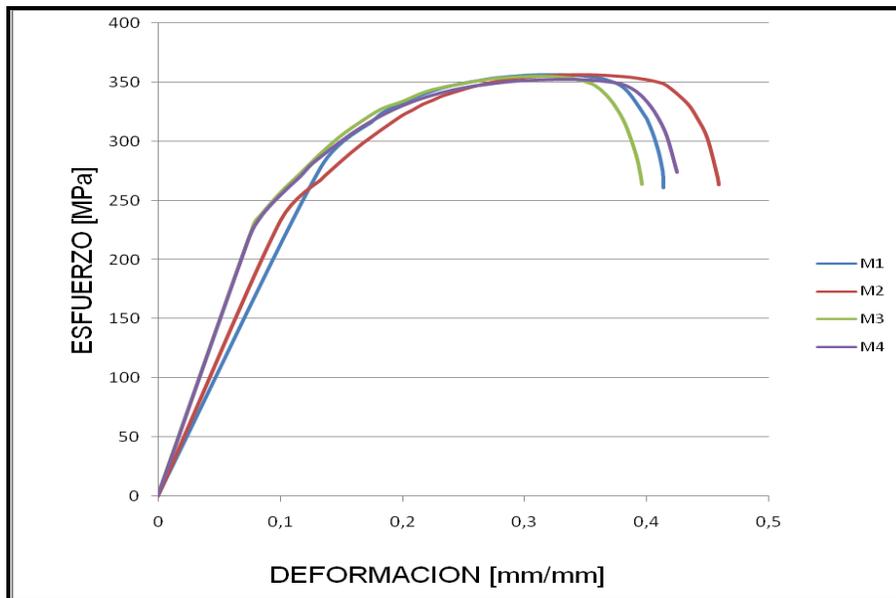
- El esfuerzo de fluencia aumentó a los dos días de exposición, luego disminuye a los cuatro días, siendo el mayor aumento el valor obtenido a los siete días que comparado con el valor de caracterización fue de 13,2%.
- El esfuerzo máximo decayó durante la exposición, en promedio un 5,9% respecto al valor de caracterización.
- El esfuerzo último decae luego del primer período de exposición y después sufre un aumento a medida que aumentan los días de exposición a la corrosión. Sin embargo los periodos de dos y cuatro días no son tan representativos debido a que solo una probeta de cada periodo no fracturó en la soldadura sin embargo los ensayos de las probetas sometidas a corrosión de siete días se encuentran respaldados por el comportamiento de tres probetas.
- El porcentaje de elongación disminuyó con el primer período de exposición después durante los siguientes períodos de exposición mantuvo su valor en promedio de 22,5%.

Como se puede notar en estas variaciones presentadas en las propiedades del material soldado pueden deberse a la acción de la corrosión debido a la pérdida de material lo cual conlleva a la reducción en el área transversal.

#### 4.4.3. Probetas soldadas con intensidad de corriente alta.

##### 4.4.3.1. Período de exposición de dos días.

En la figura 4.33 se presentan las curvas esfuerzo-deformación ingenieril



**Figura 4.33. Ensayos de tracción de las probetas soldadas con intensidad de corriente alta sometidas a corrosión durante dos (2) días.**

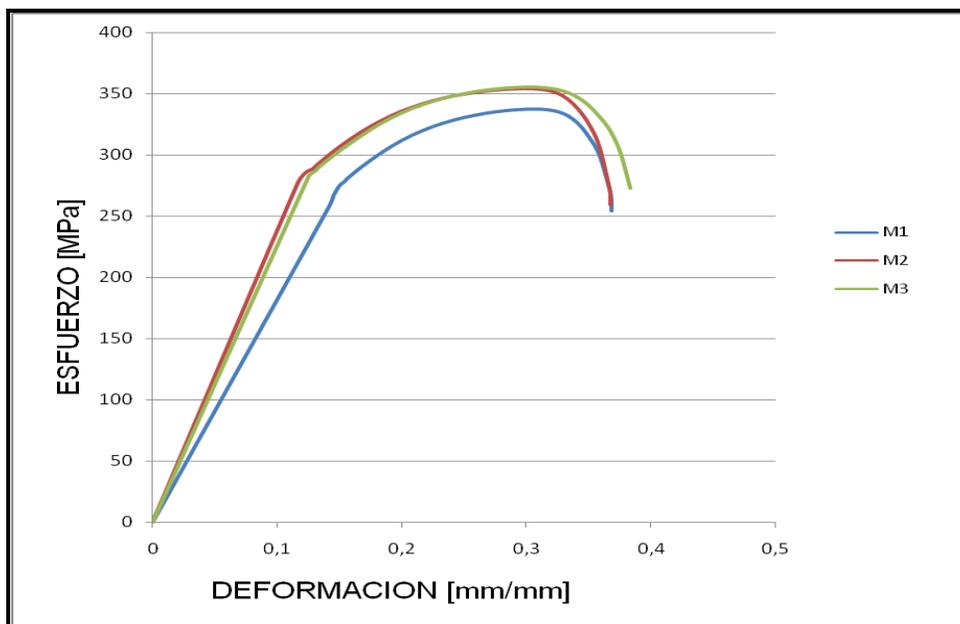
Luego en la tabla 4.18 se encuentran las propiedades mecánicas calculadas a partir de este ensayo.

**Tabla 4.18. Propiedades mecánicas de las probetas de tracción soldadas con intensidad de corriente alta sometidas a corrosión durante dos (2) días.**

Propiedades Mecánicas	M1	M2	M3	M4	Promedio	Desviación Estándar
Esfuerzo de Fluencia (Y) [MPa]	279	233	230	220	241	26,06
%RA	68	68	62	65	66	3,04
%E	27	29	25	26	27	1,89
Esfuerzo máximo [MPa]	357	357	355	352	355	2,03
Esfuerzo de Ruptura [MPa]	320	333	329	322	326	5,82

4.4.3.2. Período de exposición de cuatro días.

En la figura 4.34 se presentan las curvas esfuerzo-deformación ingenieril, luego en la tabla 4.19 se encuentran las propiedades mecánicas calculadas a partir de este ensayo.



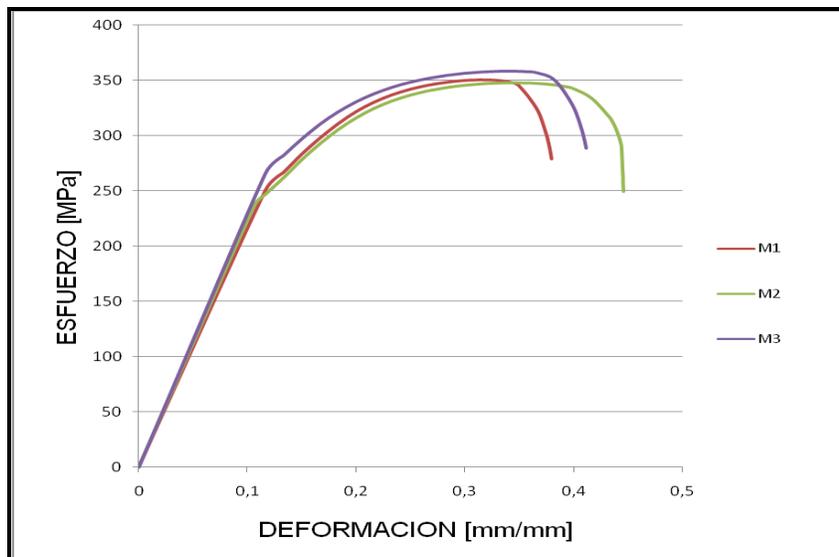
**Figura 4.34. Ensayos de tracción de las probetas soldadas con intensidad de corriente alta sometidas a corrosión durante cuatro (4) días.**

**Tabla 4.19. Propiedades mecánicas de las probetas de tracción soldadas con intensidad de corriente alta sometidas a corrosión durante cuatro (4) días.**

Propiedades Mecánicas	M1	M2	M3	Promedio
<b>Esfuerzo de Fluencia (Y) [MPa]</b>	276	278	283	279
<b>%RA</b>	66	61	65	64
<b>%E</b>	21	23	23	22
<b>Esfuerzo máximo [MPa]</b>	337	354	355	349
<b>Esfuerzo de Ruptura [MPa]</b>	314	325	331	324

#### 4.4.3.3. Período de exposición de siete días.

En la figura 4.35 se presentan las curvas esfuerzo-deformación ingenieril, luego en la tabla 4.20 se encuentran las propiedades mecánicas calculadas a partir de este ensayo.



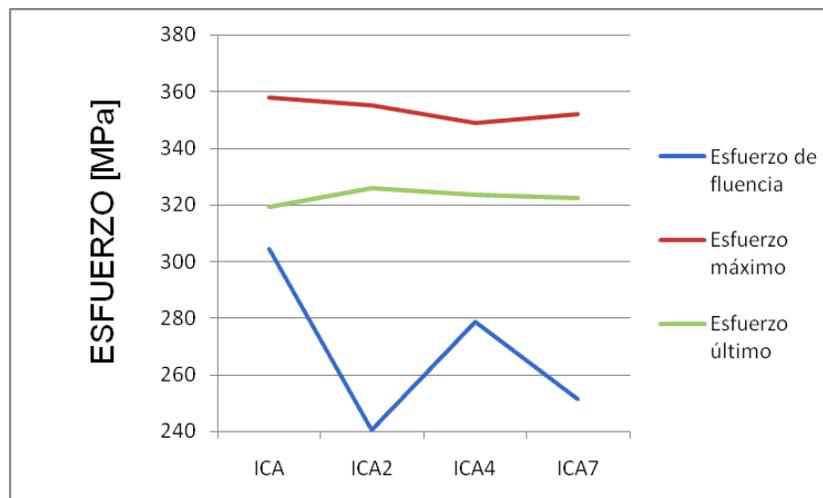
**Figura 4.35. Ensayos de tracción de las probetas soldadas con intensidad de corriente alta sometidas a corrosión durante siete (7) días.**

**Tabla 4.20. Propiedades mecánicas de las probetas de tracción soldadas con intensidad de corriente alta sometidas a corrosión durante siete (7) días.**

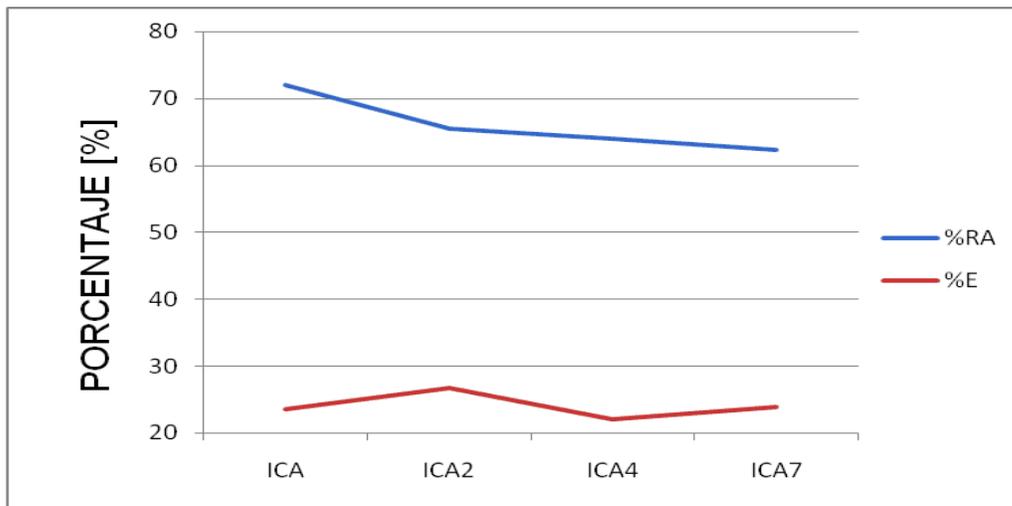
Propiedades Mecánicas	M1	M2	M3	Promedio
Esfuerzo de Fluencia (Y) [MPa]	251	237	266	252
%RA	56	68	63	62
%E	22	24	26	24
Esfuerzo máximo [MPa]	350	348	358	352
Esfuerzo de Ruptura [MPa]	324	316	327	322

4.4.3.4. Análisis de los ensayos de tracción.

En la figura 4.36 y 4.37 se muestran las graficas de comparación de los resultados obtenidos entre la caracterización del material y la caracterización del material soldado.



**Figura 4.36. Gráfica de comparación de esfuerzos obtenidos a través del ensayo de tracción.**



**Figura 4.37. Gráfica de comparación de porcentajes de reducción de área y de porcentaje de elongación obtenidos a través del ensayo de tracción.**

En las graficas mostradas anteriormente se observa que:

- El esfuerzo máximo y el esfuerzo último muestran una variación menor al 2% con respecto al valor de caracterización del material soldado bajo esta intensidad de corriente, lo cual se atribuye a la posibilidad de que no hayan sido, las muestras, afectadas por la corrosión.
- La propiedad que sufrió las mayores variaciones es el esfuerzo a la fluencia, a medida que aumentaba el período de exposición a la corrosión.
- El porcentaje de reducción de área tiende a disminuir a medida que aumenta el periodo de exposición.

## **4.5. Ensayos de Dureza.**

### *4.5.1. Muestras soldadas con intensidad de corriente baja.*

#### 4.5.1.1. Período de exposición de dos días.

En la tabla 4.21 y en la figura 4.38 se muestran los resultados obtenidos para este ensayo. Al establecer comparaciones entre los valores mostrados en la tabla y en la gráfica anteriormente dichas, con los valores las propiedades de caracterización de soldadura para intensidad de corriente baja se observa que la variación en los valores de dureza más significativos se encontró en la zona afectada por el calor, en donde el valor de dureza aumentó 8,4%, esto puede deberse a que existen zonas más afectadas por el calor y por esto la diferencia entre un valor y otro. En las otras dos zonas no se registraron variaciones importantes (menos del 2,5%) por lo que no hubo efecto de la corrosión.

**Tabla 4.21. Resultados de pruebas de dureza para muestra soldadas con intensidad de corriente baja sometida a corrosión durante dos (2) días.**

Prueba	ZS [Kgf/mm <sup>2</sup> ]	ZAC [Kgf/mm <sup>2</sup> ]	ZMB [Kgf/mm <sup>2</sup> ]
1	193	163	130
2	192	152	139
3	207	140	145
4	177	167	142
5	168	167	154
6	185	166	137
<b>Promedio</b>	187	159	141
<b>Desviación Estándar</b>	13,71	10,98	7,93

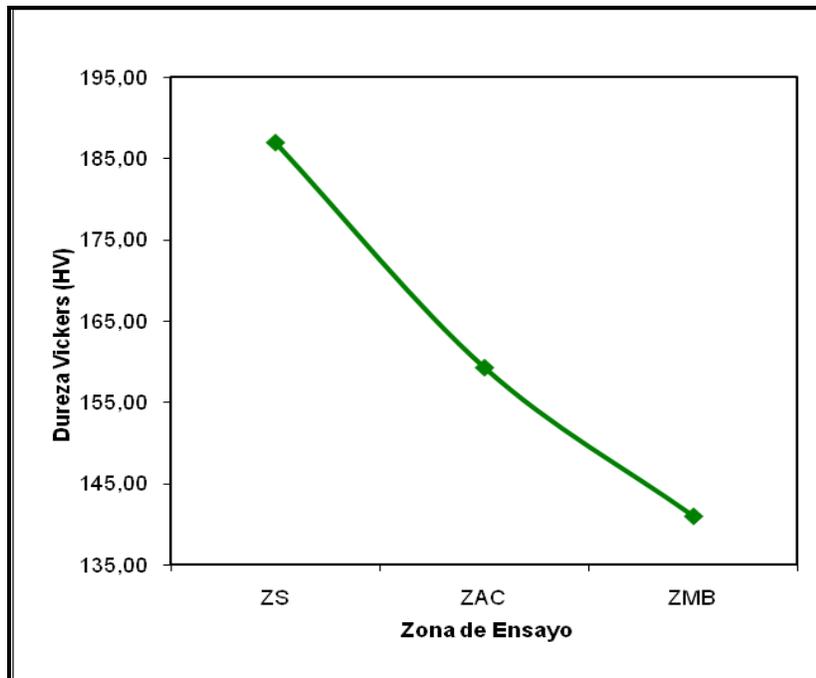


Figura 4.38. Gráfica de dureza - Zona de estudio para las muestras soldadas con intensidad de corriente baja sometidas a corrosión durante dos (2) días.

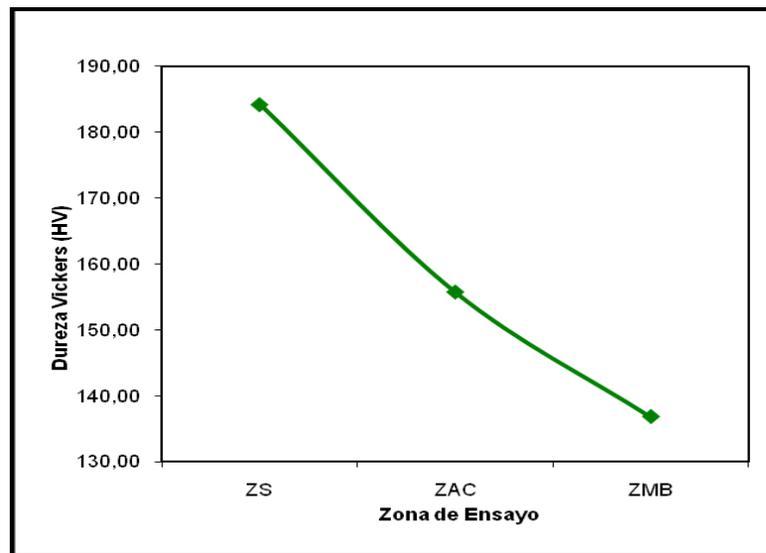
4.5.1.2. Período de exposición de cuatro días.

En la tabla 4.22 y en la figura 4.39 se muestran los resultados obtenidos para este ensayo.

Tabla 4.22. Resultados de pruebas de dureza para muestra soldadas con intensidad de corriente baja sometida a corrosión durante cuatro (4) días.

Prueba	ZS [Kgf/mm <sup>2</sup> ]	ZAC [Kgf/mm <sup>2</sup> ]	ZMB [Kgf/mm <sup>2</sup> ]
1	186	156	142
2	175	154	139
3	199	157	149
4	181	149	140
5	192	160	129

<b>6</b>	173	157	122
<b>Promedio</b>	184	156	137
<b>Desviación Estándar</b>	10,16	3,79	9,57



**Figura 4.39. Gráfica de dureza - Zona de estudio para las muestras soldadas con intensidad de corriente baja sometidas a corrosión durante cuatro (4) días.**

Al establecer comparaciones entre los valores mostrados en la tabla 4.22 y la gráfica 4.39, con los valores las propiedades de caracterización de soldadura para intensidad de corriente baja se observa que la variación en los valores de dureza más significativos se encontraron en la zona afectada por el calor, la cual aumentó 5,9% mientras que la zona del material base disminuyó 5,26%. La zona de soldadura no registro ninguna variación significativa (menos del 0,5%).

Si se comparan los valores de dureza de la muestra soldadas con intensidad de corriente baja sometida a corrosión durante dos (2) días con la expuesta a corrosión durante cuatro (4) días se obtiene una disminución en todos los valores de las muestras sometidas a corrosión durante cuatro (4)

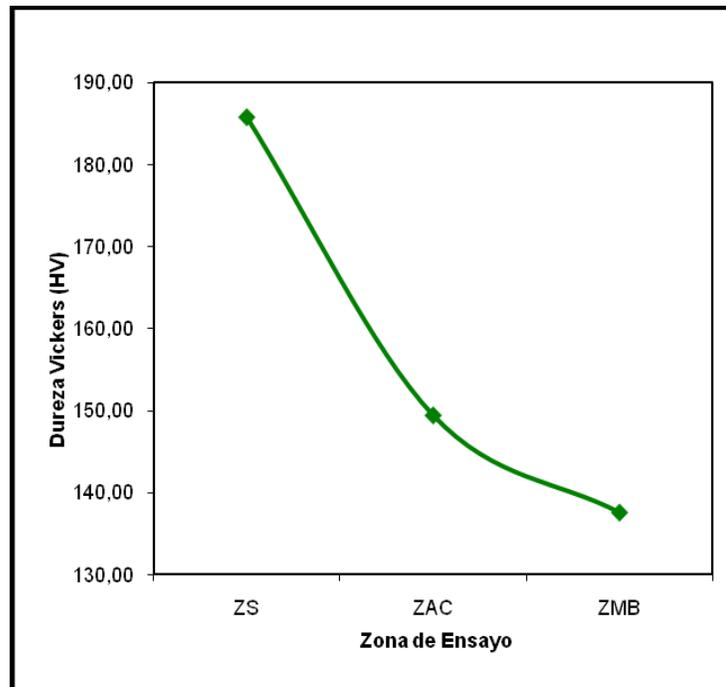
días siendo la mayor diferencia en la zona del material base donde el valor disminuyó 2,9%.

#### 4.5.1.3. Período de exposición de siete días.

En la tabla 4.23 y en la figura 4.40 se muestran los resultados obtenidos para este ensayo.

**Tabla 4.23. Resultados de pruebas de dureza para muestra soldadas con intensidad de corriente baja sometida a corrosión durante siete (7) días.** Fuente: Propia.

Prueba	ZS [Kgf/mm <sup>2</sup> ]	ZAC [Kgf/mm <sup>2</sup> ]	ZMB [Kgf/mm <sup>2</sup> ]
1	184	147	138
2	198	162	136
3	185	141	143
4	178	143	131
5	185	153	128
6	185	150	149
<b>Promedio</b>	186	149	138
<b>Desviación Estándar</b>	6,51	7,67	7,55



**Figura 4.40. Gráfica de dureza - Zona de estudio para las muestras soldadas con intensidad de corriente baja sometidas a corrosión durante siete (7) días.**

Al establecer comparaciones entre los valores mostrados en la tabla 4.23 y la gráfica 4.40, con los valores las propiedades de caracterización de soldadura para intensidad de corriente baja se observa que la variación en los valores de dureza más significativos se encontró en la zona del material base donde la disminución es de 4,8%, mientras que la zona de soldadura y la zona afectada por el calor aumentaron 0,16% y 1,6% respectivamente. Esto puede deberse a que no hubo efecto de la corrosión ni en la soldadura ni en la zona afectada por el calor, solo en el material base.

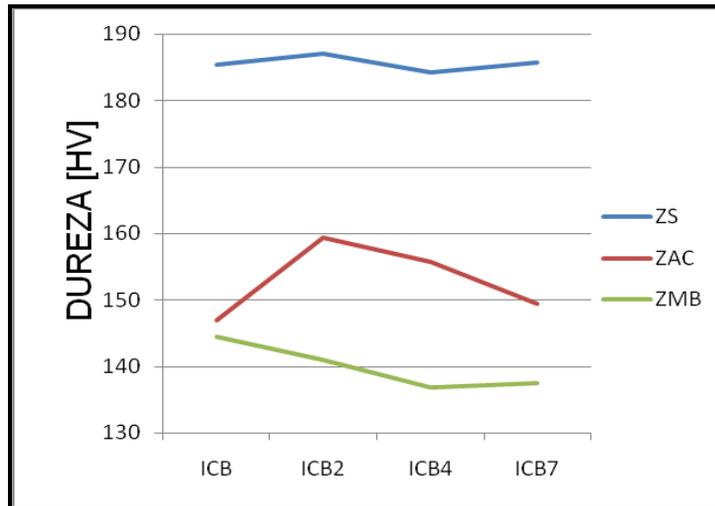
Se compararon los valores de dureza de la muestra soldadas con intensidad de corriente baja sometida a corrosión durante dos (2) días con la expuesta a corrosión durante siete (7) días, obteniéndose una disminución de 6,2% en el valor de dureza de la zona afectada por el calor, la zona de la

soldadura y del material base registraron disminución de 0,7% y 2,4% respectivamente.

Al comparar los valores de dureza de las muestras sometidas a corrosión durante cuatro (4) días con la expuesta a corrosión durante siete (7) días al igual que en la comparación anterior la mayor disminución (4,1%) ocurrió en la zona afectada por el calor, esto quiere decir que las probetas utilizadas para ser sometidas a corrosión durante 2 y 4 días presentan mayor efecto de calor producto de la soldadura a diferencia de las muestras utilizadas para caracterización y para ser sometidas a corrosión durante siete días; mientras que la zona de la soldadura y del material base registraron un aumento menor de 1%.

#### 4.5.1.4. Análisis de los ensayos de dureza.

En la figura 4.41 se puede observar la comparación (gráficamente) de los valores promedio obtenidos en cada uno de los ensayos de las muestras sometidas a corrosión junto con los resultados de caracterización del material soldado.



**Figura 4.41. Gráfica de comparación de los valores de dureza obtenidos para las muestras de intensidad de corriente baja.**

En la gráfica anterior se observa que:

- La zona de la soldadura no sufrió grandes variaciones en los valores de dureza a pesar de ser sometido a corrosión.
- En la zona afectada por el calor el valor de dureza aumentó con el primer periodo de exposición luego se observa como disminuye a medida que los periodos de exposición aumentan. Esto se debe a que las probetas utilizadas para ser sometidas a corrosión durante 2 y 4 días presentan mayor efecto de calor producto de la soldadura a diferencia de las muestras utilizadas para caracterización y para ser sometidas a corrosión durante siete días. Por lo que no hubo efecto de la corrosión.
- Los valores de dureza en el material base disminuyen en los dos primeros periodos de exposición, sin embargo al tercer periodo la curva tiende a estabilizarse con el periodo de exposición de cuatro días. Esto puede deberse que hubo efecto por parte de la corrosión en esta zona.

#### 4.5.2. Muestras soldadas con intensidad de corriente media.

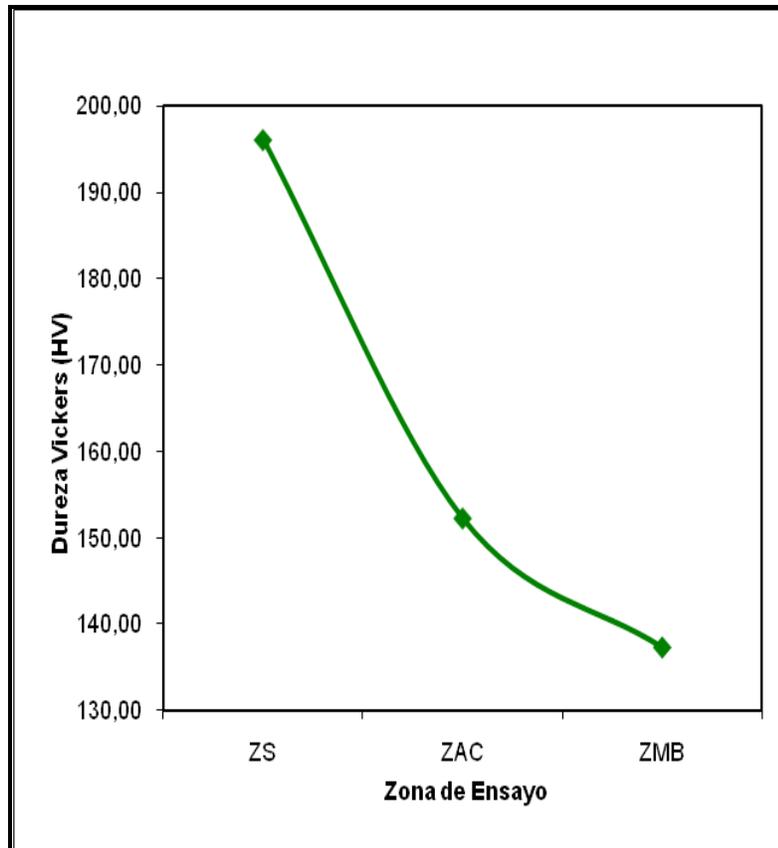
##### 4.5.2.1. Período de exposición de dos días.

En la tabla 4.24 y en la figura 4.42 se muestran los resultados obtenidos para este ensayo.

**Tabla 4.24. Resultados de pruebas de dureza para muestra soldadas con intensidad de corriente media sometida a corrosión durante dos (2) días.**

Prueba	ZS [Kgf/mm <sup>2</sup> ]	ZAC [Kgf/mm <sup>2</sup> ]	ZMB [Kgf/mm <sup>2</sup> ]
1	188	148	153
2	203	155	129
3	199	158	144
4	179	146	121

<b>5</b>	223	159	140
<b>6</b>	185	148	138
<b>Promedio</b>	196	152	137
<b>Desviación Estándar</b>	15,81	5,66	11,25



**Figura 4.42. Gráfica de dureza - Zona de estudio para las muestras soldadas con intensidad de corriente media sometidas a corrosión durante dos (2) días.**

Al establecer comparaciones entre los valores mostrados en la tabla 4.24 y la gráfica 4.42, con los valores las propiedades de caracterización de soldadura para intensidad de corriente media se observa un aumento de 9,18% en el valor de la dureza de la zona de la soldadura, siendo esta la mayor variación de los valores de dureza obtenido, y un aumento de 4,7% en

la zona del material base, mientras que la zona afectada por el calor disminuyó 1,7%

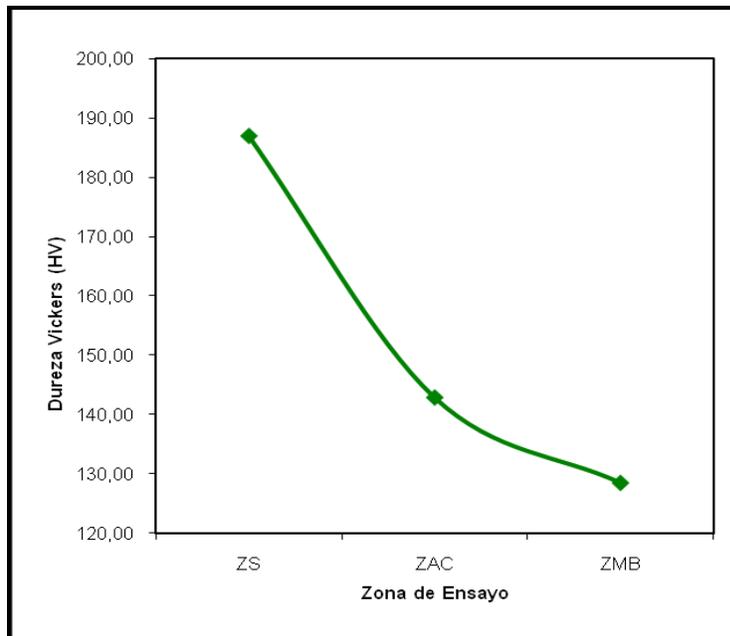
#### 4.5.2.2. Período de exposición de cuatro días.

En la tabla 4.25 y en la figura 4.43 se muestran los resultados obtenidos para este ensayo.

**Tabla 4.25. Resultados de pruebas de dureza para muestra soldadas con intensidad de corriente media sometida a corrosión durante cuatro (4) días.**

Prueba	ZS [Kgf/mm <sup>2</sup> ]	ZAC [Kgf/mm <sup>2</sup> ]	ZMB [Kgf/mm <sup>2</sup> ]
1	187	133	120
2	177	140	135
3	194	139	123
4	176	149	136
5	192	156	125
6	197	142	132
<b>Promedio</b>	187	143	129
<b>Desviación Estándar</b>	9,17	8,13	6,63

Al establecer comparaciones entre los valores mostrados en la tabla 4.25 y la gráfica 4.43, con los valores las propiedades de caracterización de soldadura para intensidad de corriente media se observa que la variación en los valores de dureza más significativos se encontraron en la zona afectada por el calor la cual disminuyó 7,8%. Mientras que la zona de la soldadura aumentó 4,2% la zona del material base disminuyó apenas 2,1%.



**Figura 4.43. Gráfica de dureza - Zona de estudio para las muestras soldadas con intensidad de corriente media sometidas a corrosión durante cuatro (4) días.**

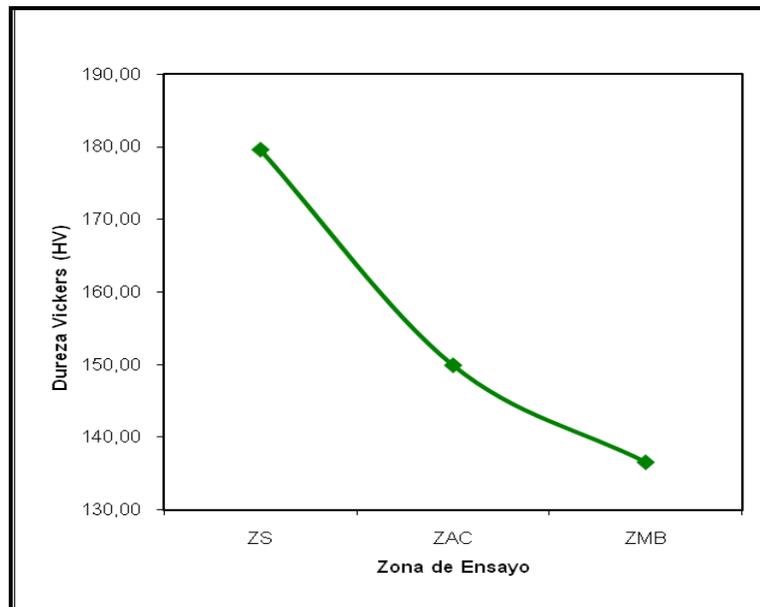
Si se comparan los valores de dureza de la muestra soldadas con intensidad de corriente media sometida a corrosión durante dos (2) días con la expuesta a corrosión durante cuatro (4) días se obtiene una disminución de 4,6%, 6,2% y 6,5% respectivamente en cada zona: zona de soldadura, zona afectada por el calor y zona del material base. Esto puede deberse a un efecto de corrosión en las diferentes zonas del material.

#### 4.5.2.3. Período de exposición de siete días.

En la tabla 4.26 y en la figura 4.44 se muestran los resultados obtenidos para este ensayo.

**Tabla 4.26. Resultados de pruebas de dureza para muestra soldadas con intensidad de corriente media sometida a corrosión durante siete (7) días.**

Prueba	ZS [Kgf/mm <sup>2</sup> ]	ZAC [Kgf/mm <sup>2</sup> ]	ZMB [Kgf/mm <sup>2</sup> ]
1	172	151	119
2	189	149	135
3	176	145	135
4	178	156	146
5	184	153	138
6	179	145	147
<b>Promedio</b>	180	150	137
<b>Desviación Estándar</b>	6,17	4,57	9,94



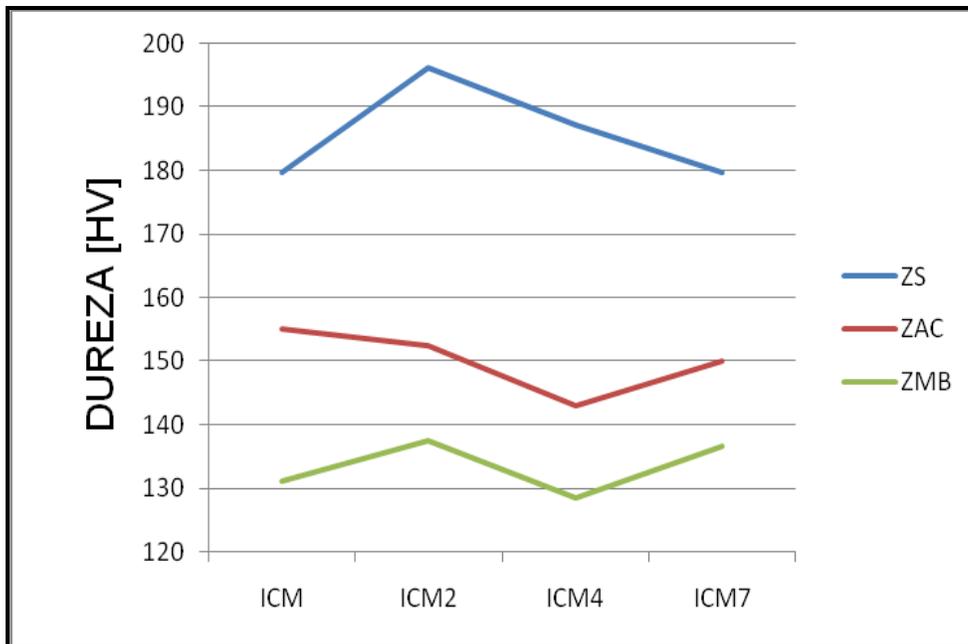
**Figura 4.44. Gráfica de dureza - Zona de estudio para las muestras soldadas con intensidad de corriente media sometidas a corrosión durante siete (7) días.**

Al establecer comparaciones entre los valores mostrados en la tabla 4.26 y la gráfica 4.44, con los valores las propiedades de caracterización de soldadura para intensidad de corriente media se obtiene una disminución de 3,3% del valor de dureza en la zona afectada por el calor.

Se compararon los valores de dureza de la muestra soldadas con intensidad de corriente media sometida a corrosión durante dos (2) días con la expuesta a corrosión durante siete (7) días, obteniéndose una disminución de 8,4% en el valor de dureza de la zona de la soldadura, esto puede deberse a efectos de la corrosión.

#### 4.5.2.4. Análisis de los ensayos de dureza.

En la figura 4.45 se muestra gráficamente la comparación entre los valores de dureza obtenidos tanto para los ensayos de caracterización del material soldado como para cada una de las muestras sometidas a corrosión de intensidad de corriente media.



**Figura 4.45. Gráfica de comparación de los valores de dureza obtenidos para las muestras de intensidad de corriente media.**

Al observar la gráfica anterior se puede decir que:

- Los valores de dureza en la zona de soldadura aumentan más de 15HV una vez sometido a dos días de corrosión luego decae con el aumento del periodo de exposición.
- En la zona afectada por el calor los valores de dureza decaen en los dos primeros periodos de exposición, luego aumenta para una periodo de exposición de siete días esto puede deberse a la existencia de martensita en esta zona lo que indica que un mayor nivel de efecto de calor en esta zona, sin embargo el valor obtenido en este último período es menor al obtenido en la caracterización del material. Por lo que se deduce un posible efecto de corrosión en esta zona.
- Los valores de dureza obtenidos en la zona afectada por el calor no sufre variaciones mayores a 10HV.

Con esto se puede notar que las zonas que más sufrieron la corrosión son la zona de la soldadura y la zona afectada por el calor.

#### 4.5.3. Muestras soldadas con intensidad de corriente alta.

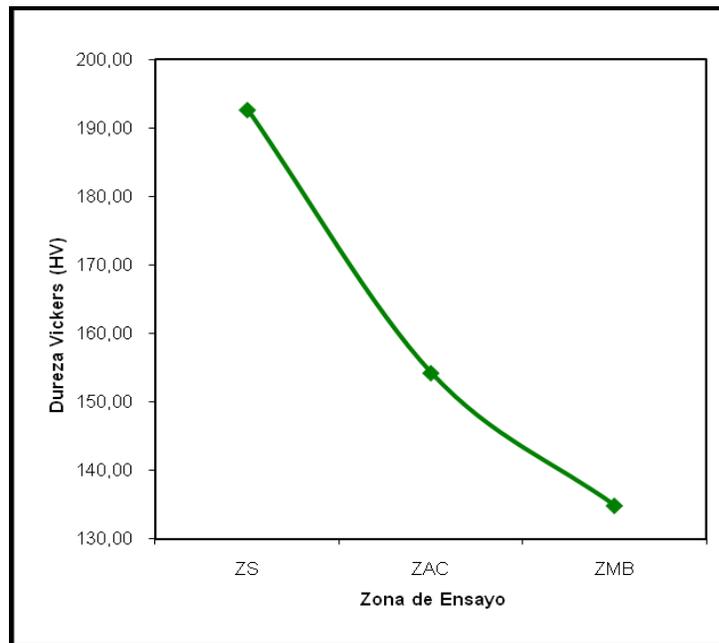
##### 4.5.3.1. Período de exposición de dos días.

En la tabla 4.27 y en la figura 4.46 se muestran los resultados obtenidos para este ensayo.

Al establecer comparaciones entre los valores mostrados en la tabla 4.28 y la gráfica 4.46, con los valores las propiedades de caracterización de soldadura para intensidad de corriente alta se obtiene que el valor de dureza en la zona de la soldadura aumentó 3,8% y la zona afectada por el calor también aumentó 1,8%, mientras que la zona del material base disminuyó 1,7%.

**Tabla 4.27. Resultados de pruebas de dureza para muestra soldadas con intensidad de corriente alta sometida a corrosión durante dos (2) días.** Fuente: Propia.

Prueba	ZS [Kgf/mm <sup>2</sup> ]	ZAC [Kgf/mm <sup>2</sup> ]	ZMB [Kgf/mm <sup>2</sup> ]
1	196	157	138
2	203	161	128
3	191	160	149
4	188	162	125
5	193	142	134
6	186	143	136
<b>Promedio</b>	193	154	135
<b>Desviación Estándar</b>	6,21	9,57	8,37



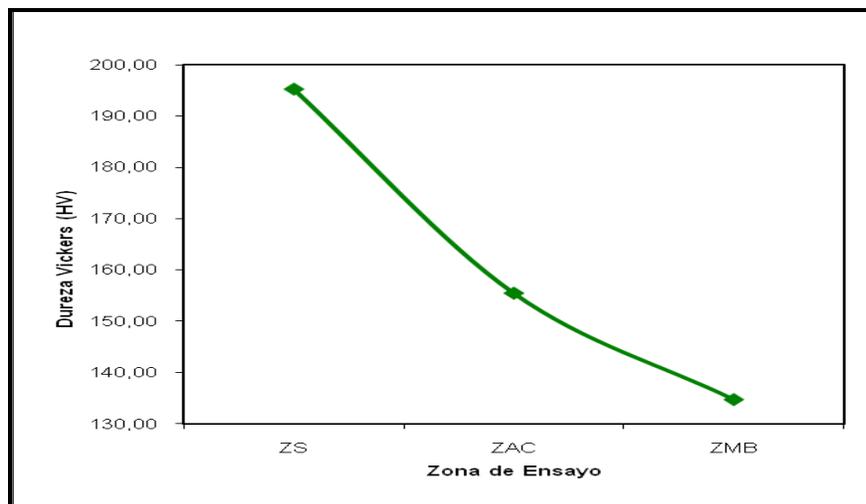
**Figura 4.46. Gráfica de dureza - Zona de estudio para las muestras soldadas con intensidad de corriente alta sometidas a corrosión durante dos (2) días.**

4.5.3.2. Período de exposición de cuatro (4) días.

En la tabla 4.28 y en la figura 4.47 se muestran los resultados obtenidos para este ensayo.

**Tabla 4.28. Resultados de pruebas de dureza para muestra soldadas con intensidad de corriente alta sometida a corrosión durante cuatro (4) días.**

Prueba	ZS [Kgf/mm <sup>2</sup> ]	ZAC [Kgf/mm <sup>2</sup> ]	ZMB [Kgf/mm <sup>2</sup> ]
1	199	169	118
2	183	157	132
3	197	158	132
4	208	169	140
5	206	134	142
6	179	146	145
<b>Promedio</b>	195	156	135
<b>Desviación Estándar</b>	11,99	13,49	9,72



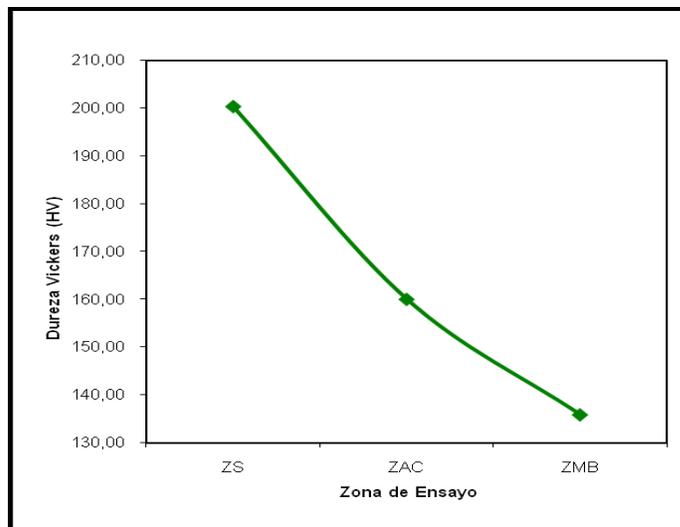
**Figura 4.47. Gráfica de dureza - Zona de estudio para las muestras soldadas con intensidad de corriente alta sometidas a corrosión durante cuatro (4) días.**

4.5.3.3. Período de exposición de siete días.

En la tabla 4.29 y en la figura 4.48 se muestran los resultados obtenidos para este ensayo.

**Tabla 4.29. Resultados de pruebas de dureza para muestra sometida a soldadas con intensidad de corriente alta corrosión durante siete (7) días.** Fuente: Propia.

Prueba	ZS [Kgf/mm <sup>2</sup> ]	ZAC [Kgf/mm <sup>2</sup> ]	ZMB [Kgf/mm <sup>2</sup> ]
1	199	160	130
2	213	155	131
3	207	167	133
4	188	159	138
5	202	160	142
6	194	160	142
<b>Promedio</b>	200	160	136
<b>Desviación Estándar</b>	9,14	4,09	5,24

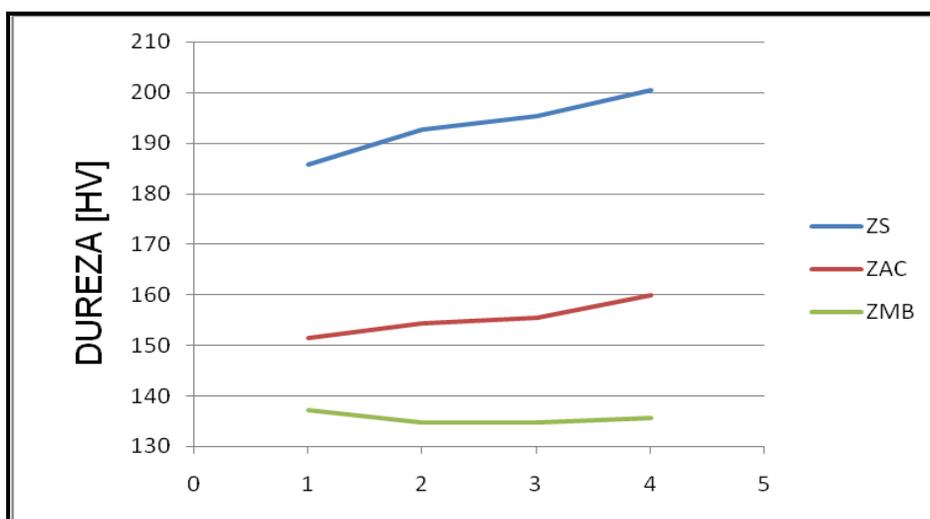


**Figura 4.48. Gráfica de dureza - Zona de estudio para las muestras soldadas con intensidad de corriente alta sometidas a corrosión durante siete (7) días.**

Al establecer comparaciones entre los valores mostrados en la tabla y la gráfica nombradas anteriormente, con los valores las propiedades de caracterización de soldadura para intensidad de corriente media se obtuvo que tanto la zona de la soldadura como la zona afectada por el calor aumentaron 7,9% y 5,6% respectivamente, mientras que la zona del material base disminuyó 1,1%.

#### 4.5.3.4. Análisis de los ensayos de dureza.

En la figura 4.49 se muestran gráficamente la comparación de los valores de dureza obtenidos para cada una de las muestras tanto para las de caracterización del material soldado como para las muestras sometidas a corrosión con intensidad de corriente alta.



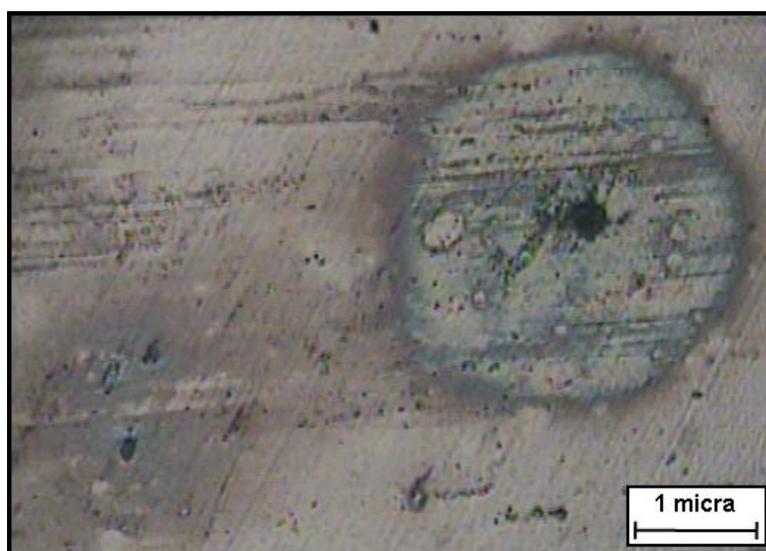
**Figura 4.49. Gráfica de comparación de los valores de dureza obtenidos para las muestras de intensidad de corriente alta.**

En la figura anterior se nota que tanto los valores de dureza en la zona de soldadura como los valores de dureza en la zona afectada por el calor aumentan a medida que aumentan los períodos de exposición a la corrosión, mientras que los valores de dureza de la zona del material base disminuyen

solo un poco y luego se mantienen medianamente constantes. Es probable que la corrosión no afecte la dureza del material, ya que no es posible que este se endurezca a medida que aumenten los periodos de exposición, por lo que la variación de esta propiedad debe depender directamente de los parámetros y condiciones bajo las cuales se realice la soldadura.

#### **4.6. Ensayos de Metalografía.**

Las figuras 4.50 y 4.51 se observan parte de la sección transversal de una muestra expuesta a la corrosión durante cuatro (4) días y otra expuesta a la corrosión durante siete (7) días respectivamente.



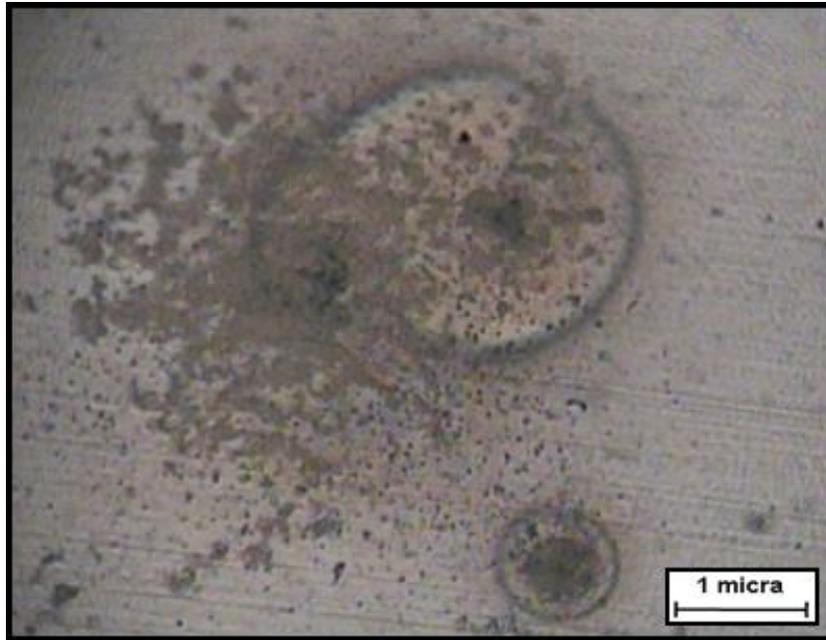
**Figura 4.50. Microscopía (sin ataque) a 1000X de la sección transversal de una muestra expuesta a la corrosión durante cuatro (4) días.**

Al observar la muestra de la figura 4.53 se pueden detallar las zonas de corrosión localizada.

A la superficie de la muestra que aparece en la figura 4.50 se le aplicó desbaste grueso y fino (sin pulido ni ataque).

Al observar la muestra de la figura 4.51 se pueden detallar las zonas de corrosión localizada.

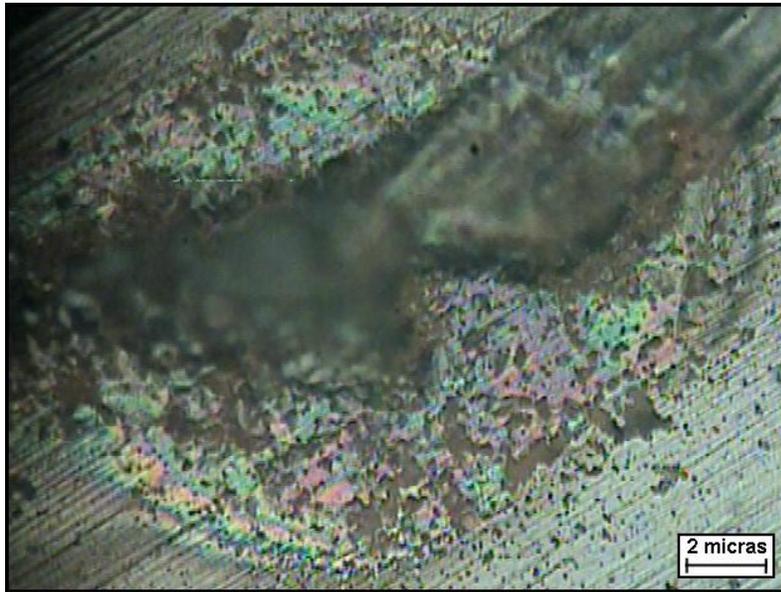
A la superficie de la muestra que aparece en la figura 4.51 se le aplicó desbaste grueso y fino (sin pulido ni ataque). Adicionalmente, la imagen fue tomada con un aumento de 1000X.



**Figura 4.51 Microscopía (sin ataque) a 1000X de la sección transversal de una muestra expuesta a la corrosión durante siete (7) días.**

La corrosión localizada actúa con una tasa mínima de pérdida de metal y comienzan en aquellas zonas donde se produce un incremento de la velocidad de corrosión, como por ejemplo, en impurezas u otras heterogeneidades presentes en el material.

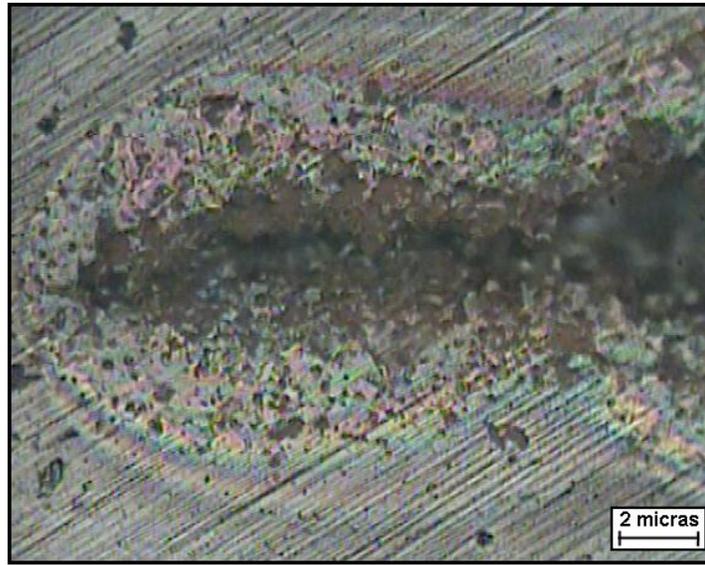
Las figuras 4.52 y 4.53 muestran otro tipo de corrosión localizada; corrosión por grietas, en las zonas (o grietas) de las juntas donde no hubo penetración completa de la soldadura.



**Figura 4.52. Microscopía a 100X (sin ataque) de la sección transversal de una muestra soldada con intensidad de corriente media expuesta a la corrosión durante siete (7) días.**

La corrosión por grietas puede ocurrir dentro de las zonas de estancamiento creadas por las interfaces entre las secciones soldadas de los tubos donde no penetró completamente el cordón de soldadura, debido a la acumulación de solución salina, que no escurría, en éstas zonas.

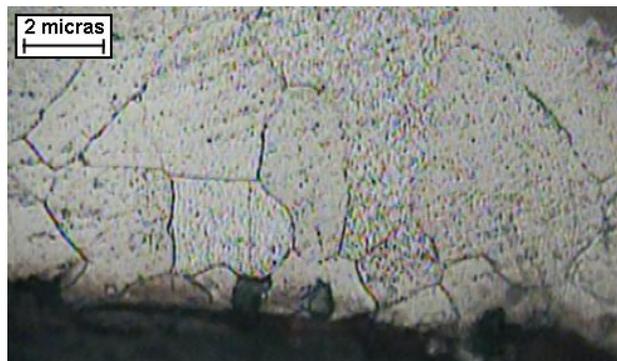
Tanto en la figura 4.52 como en la figura 4.53 se nota la acumulación de productos de la corrosión en las adyacencias de las grietas y cómo la corrosión ha penetrado en el material. Probablemente el tamaño de estas grietas era menor antes de que las muestras fueran expuestas a la corrosión y, éste fenómeno ocurrió en todas las probetas que fueron sometidas al ensayo de corrosión.



**Figura 4.53. Microscopía 100X (sin ataque) de la sección transversal de una muestra soldada con intensidad de corriente alta expuesta a la corrosión durante siete (7) días.**

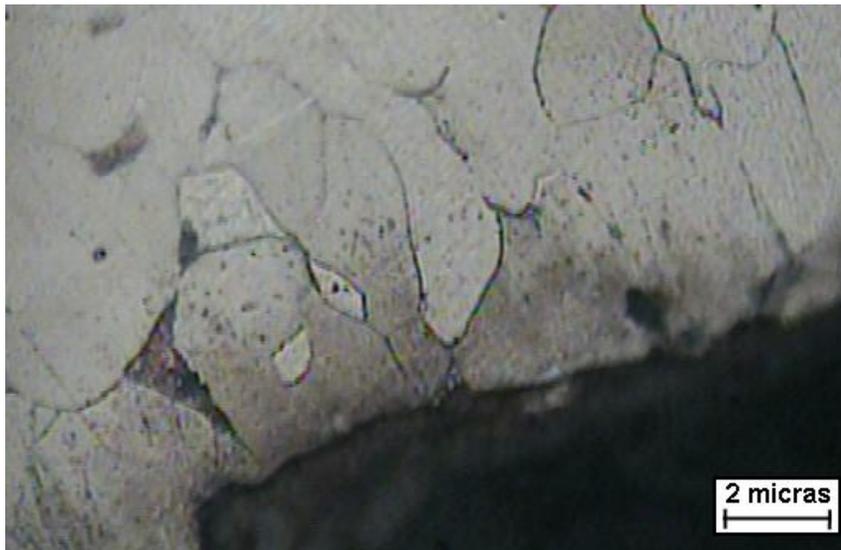
Los tipos de corrosión detectados hasta este punto (corrosión localizada por grietas y por picaduras) ocurrieron en las secciones transversales de las muestras estudiadas, pero sólo en los bordes que permanecieron expuestos al ataque de la solución salina en la cámara de corrosión.

En las figuras 4.54 y 4.55, se muestra el fenómeno de corrosión uniforme registrado en las superficies de las probetas expuestas al medio corrosivo.



**Figura 4.54. Microscopía 400X de la sección transversal de una muestra expuesta a la corrosión durante cuatro (4) días.**

La zona negra que se encuentra en la parte inferior de las figuras 4.54 y 4.55 representa la baquelita (material que se usó para embutir las probetas) y se muestra para detallar la corrosión uniforme generada en la superficie de las probetas. Las zonas (en forma de franjas por todo el borde) oscuras que se encuentran en la parte inferior de las probetas es la capa de corrosión uniforme generada; note que en la figura 4.58 (muestra sometida a la corrosión durante 7 días) se visualiza más profunda (aproximadamente  $2 \mu\text{m}$ ) la penetración de la corrosión en el material que en la figura 4.56 (aproximadamente  $1 \mu\text{m}$ , muestra sometida al ensayo de corrosión durante 4 días).



**Figura 4.55. Microscopía 400X de la sección transversal de una muestra expuesta a la corrosión durante siete (7) días.**

La corrosión uniforme o generalizada, se caracteriza por una reacción electroquímica que actúa en la superficie completa del material expuesto, por lo tanto, ésta afectó las propiedades mecánicas del material al originar una pérdida de masa en el mismo (lo que conlleva a una reducción en el área transversal). Tanto la corrosión por grietas y la corrosión por picaduras pudieron ocasionar que algunas de las probetas fallaran en la soldadura,

debido a que estos fenómenos se presentaron directamente en las secciones de las juntas soldadas.

#### **4.7. Ensayos de Macroscopía.**

Como se puede observar en los ensayos de tracción, sólo una de las probetas con proceso de soldadura con intensidad corriente baja se obtuvo el comportamiento esperado, el resto de las probetas soldadas bajo este parámetro fallaron en la soldadura. Es por esto que se realiza un análisis macroscópico a la soldadura de una las muestras que fracturaron en la soldadura y a la única muestra con la que se obtuvo el comportamiento deseado. De igual manera se realizó análisis macroscópico para las probetas soldadas con intensidad de corriente media, ya que la mayoría de estas probetas una vez que se sometieron a corrosión fallaron en la soldadura al ensayarlas a tracción.

Para este análisis se cortaron las probetas a ser preparadas, una vez cortadas se procedió al desbaste grueso y fino dejando la superficie plana, el ataque de los especímenes se llevo a cabo con un reactivo químico (Yodo en Yoduro de Potasio al 10%).

Una vez atacadas las probetas, se procedió (con la ayuda de un lente de aumento 10X y un vernier) a medir y evaluar la soldadura en cada una de las probetas. Los resultados obtenidos son:

- La soldadura en cada una de ellas se mostró con líneas curvas una dentro de otras reduciéndose a medida que se acercaban al centro de la soldadura.
- En la sección de la probeta soldada con intensidad de corriente baja en la que se obtuvo el comportamiento deseado se midió la soldadura, resultando: 1,5 mm de penetración, 5 mm de ancho del cordón de

soldadura, y éste estaba al mismo nivel que la superficie del material base.

- En las secciones estudiadas de la probeta soldada con intensidad de corriente baja que fracturó en la soldadura, se obtuvo: 1 mm de penetración, 3,5 mm de ancho del cordón de soldadura.
- En la sección de la probeta soldada con intensidad de corriente media con la que se obtuvo el comportamiento deseado se midió la soldadura, resultando: 2 mm de penetración, 5 mm de ancho del cordón de soldadura, y éste no estaba al mismo nivel que la superficie del material base, presentó una concavidad de profundidad 0,8 mm aproximadamente.
- En las secciones estudiadas de la probeta soldada con intensidad de corriente media que fracturó en la soldadura, se obtuvo: 1,3 mm de penetración, 4,5 mm de ancho del cordón de soldadura.

En ninguna de las soldaduras realizadas se observó penetración completa, sin embargo en aquellas probetas que fallaron en la junta la penetración fue menor, lo que sin duda fue la consecuencia de este comportamiento.

Si la penetración es poca o incompleta, el área transversal en la sección de la soldadura será menor que en el resto de la probeta; es decir que para la misma carga el área a soportar será menor (concentrador de esfuerzo). Éste fenómeno afectó a las probetas soldadas con intensidad de corriente baja y algunas de las soldadas con intensidad de corriente media sometidas a corrosión, pero no a las soldadas con intensidad de corriente alta (antes o después de la corrosión), puesto que en estas últimas hubo un endurecimiento mayor (producto del calor generado por el valor alto de la intensidad de corriente) y una penetración más profunda.

# CAPÍTULO 5

## *Conclusiones y Recomendaciones*

---

---

### 5.1. CONCLUSIONES

- Las propiedades mecánicas del material adquirido corresponden con las características del material en estudio.
- Se manifestó corrosión por grietas en las ranuras (donde no hubo fusión por la poca penetración) de las probetas soldadas con intensidad de corriente baja y media.
- El efecto corrosivo en el material se manifestó principalmente en forma de corrosión uniforme (generalizada) en todas las superficies expuestas directamente al medio corrosivo.
- A medida que aumenta el período de corrosión, la franja de óxido en la superficie del material se hace más profunda.
- La microestructura del material antes y después de la corrosión resultó ser la misma en cuanto a fases (microestructura).

- La propiedad de dureza no se vio afectada por la exposición a la corrosión.
- Las propiedades mecánicas obtenidas del ensayo de tracción disminuyeron debido a la pérdida de masa que sufrieron las probetas durante la corrosión, lo que redujo el área transversal de las mismas.
- Las mejores propiedades mecánicas tanto en el ensayo de tracción como en el de microdureza se manifestaron en las probetas soldadas con el valor de intensidad de corriente alto; 80-90 A, por lo que este se establece como el valor óptimo (entre los tres estudiados) de este parámetro, para este proceso de soldadura.

## 5.2. RECOMENDACIONES

- Aumentar el periodo de exposición en los ensayos de corrosión.
- Realizar las juntas soldadas utilizando intensidades de corriente mayores.
- Realizar varias pasadas en la junta soldada para mejorar la penetración
- Variar otros parámetros en la soldadura, por ejemplo, el flujo de gas, velocidad de avance, el tipo de corriente, entre otros.
- Realizar el estudio del efecto de corrosión en otros procesos de soldadura.

# *REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS*

---

---

- Askeland (1998). Ciencia e Ingeniería de los Materiales, tercera edición, INTERNATIONAL THOMSON EDITORES.
- ASM Metals HANDBOOK Volume 1: Properties and Selection: Iron Steels and High performance alloys (1993).
- ASM Metals HANDBOOK Volume 6: Welding, Brazing and Soldari (1993).
- ASM Metals HANDBOOK Volume 9: Metallography and Microstruct (1192).
- ASM Metals HANDBOOK Volume 13A: Corrosion Fundamentals, Testing, and Protection (2003).
- ASTM A 178, Standard Specification for Electric-Resistance-Welded Carbon Steel and Carbon-Manganese Steel Boiler and Superheater Tubes.
- ASTM B 117 – 07, Standar Practice for Operating Salt Spray (fog) Apparatus (2007).
- ASTM E 3 – 01, Guide for Preparation of Metallographic Specimens (2001).

- ASTM E 8M – 04, Standar Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, (2004).
- ASTM G 1 – 03, Standar Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens (2003).
- ASTM G 50 – 76, Standard Practice for Conducting Atmospheric Corrosion Tests on Metals (Reapproved 1997).
- Ávila y Genescá (1987). Más allá de la Herrumbre I. Biblioteca digital, La Ciencia Para todos, FONDO DE CULTURA ECONOMICA, S. A. DE C. V.
- AWS B4.0 Standard Methods for Mechanical Testing of Welds (1998).
- Barrantes, Campos, y Gutiérrez (2006) Sistemas De Control En Calderas De Vapor. Universidad De Costa Rica, Facultad De Ingeniería.
- Castro (2006). Manual de Prácticas del Laboratorio de Materiales, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, UNIVERSIDAD DE CARABOBO.
- Catálogo ESAB, 2009.
- Dantas, Araujo, De Freitas (2008). Corrosion of materials used in the solar energy industry. *Anti – Corrosion Methods and Materials*, 55 (3), 150-155. ProQuest Science Journals database. (Document ID: 1484418051).
- Groover (1997). *FUNDAMENTOS DE MANUFACTURA MODERNA, Materiales, Procesos y Sistemas*, primera edición en español, Editorial Prentice Hall.
- Guthrie, Battat y Grethlein (2001). *Acelerated Corrosion Testing*, Material ease AMPTIAC, Rome, NY.

- Martínez y Azuaga (1997). Medición del módulo de elasticidad de Young, Laboratorio IV – Dpto. de Física – UBA.
- M. Vogt (1905). Causas De La Corrosión En Las Calderas, Revista De Obras Públicas. Volumen 1542 (numero 53) tomo II.
- Pacheco, Chávez y Paredes (2003). Causas de Fallas en Calderas. Edición Especial ESPOLCiencia Revista Tecnológica, pp. 55-65.
- Pender (2001). SOLDADURA, tercera edición en español, Editorial McGraw-Hill, pp. 162-174.
- Quero y Tabares (2004). ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS ACEROS INOXIDABLES AISI 304 Y AISI 316 SOMETIDOS A CONDICIONES DE FATIGA EN MEDIO CORROSIVO. Trabajo de Grado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, pp. 45-55, 57-67.
- Rezakhani (2007). Corrosion behaviors of several thermal spray coatings used on boiler tubes at elevated temperatures.
- Rodríguez (2001). MANUAL DE SOLDADURA, Soldadura Eléctrica, MIG y TIG, 1era edición, Librería y Editorial ALSINA.
- Tecnología industrial (2008). Procedimiento de unión: Soldadura. I.E.S. “Cristóbal de Monroy”. Dpto. de Tecnología. Procedimiento de unión.
- Terán, Tovar, Portocarrero, y De Sánchez (2004). ESTUDIO DE LA CORROSION PRODUCIDA EN ACEROS INOXIDABLES 304 EN PROCESOS DE SOLDADURA, Dyna, Universidad de Nacional de Colombia, volumen 71 (numero 144), pp. 61-66
- Uzcátegui (1973). CORROSIÓN, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, UNIVERSIDAD DE CARABOBO.
- Villarroel, Reyes, García, Crespo, Subero y Vargas (1989). Materiales Metálicos. Ensayo de Dureza Vickers. (1ra Revisión) COVENIN 616-89.

- Yépez y Affaqui (2009). Procedimiento para el funcionamiento de la Cámara de Niebla Salina, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, Laboratorio de Materiales, UNIVERSIDAD DE CARABOBO.
- Zalazar (2001). SOLDADURA POR ARCO CON ELECTRODO DE TUNGSTENO NO CONSUMIBLE, Laboratorio de metalografía y soldadura, UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE, Cuaderno F.I. N° 2-2001.

# *Introducción*

---

---

Los aceros ASTM A 178 son los más utilizados en la industria de la fabricación de calderas, intercambiadores de calor, entre otros; debido a su calidad y bajo costo comparado con otros aceros. Este material está diseñado para soportar altas temperaturas, lo cual lo hace ideal para la fabricación de los equipos mencionados. Debido a su aplicación es sometido constantemente a la corrosión o a la presencia de medios corrosivos, los cuales debilitan al material, logrando así numerosas fallas en el equipo que se haya fabricado con este acero.

La corrosión se define como el deterioro de un material como resultado del ataque químico de su entorno. Ésta se refiere específicamente a cualquier proceso que involucre el deterioro o degradación de componentes del metal. Siempre que la corrosión esté originada por una reacción química la velocidad a la que tiene lugar dependerá en alguna medida de la temperatura, la composición del fluido corrosivo y las propiedades de los metales en cuestión.

Actualmente en la industria se lleva una gran lucha contra el fenómeno de la corrosión ya que el mismo es inevitable por formarse debido a las condiciones de trabajo, aunque éstas se puedan reducir siempre van originar deterioro en alguna medida, es la ley natural. Desde hace muchos años se está estudiando la manera de reducir los daños ocasionados por el fenómeno

de corrosión; se han creado pinturas anticorrosivas, procesos de recubrimiento anticorrosivos, y un sin número de investigaciones sobre las causas de este fenómeno y la manera de cómo reducirlo.

Con esta investigación se busca ampliar el estudio acerca del efecto del fenómeno de corrosión sobre el proceso de soldadura TIG (o GTAW) realizado bajo tres valores de intensidad de corriente sometidos en un medio de solución salina al 5% de sodio durante tres diferentes períodos de exposición. El objeto es evaluar la corrosión producida en aceros ASTM A 178 en procesos de soldadura TIG mediante la variación de las propiedades mecánicas antes y después de la exposición al medio corrosivo.

El presente trabajo está constituido por cinco capítulos en donde se le da un orden progresivo al estudio de este tema.

En el primer capítulo se planteará la situación problemática, así como también el objetivo general y los específicos de dicho trabajo con los cuales se establecerá la dirección que tomará el mismo. Además se mostrarán el alcance, limitaciones y justificaciones que sustentan el estudio.

El segundo capítulo abarcará todas las teorías necesarias para proveer de conocimientos sobre el tema con lo que se podrán alcanzar los objetivos planteados y los mejores resultados. Aquí se explicarán los tipos de aceros al carbono (específicamente los de bajo contenido de carbono), sus aplicaciones, los procesos de manufactura en general, los procesos de soldadura por arco eléctrico haciendo énfasis en el proceso de electrodo de tungsteno y gas inerte protector (TIG), así como también los tipos de corrosión y su relación con las juntas soldadas.

El tercer capítulo, presentará la metodología empleada para desarrollar la investigación, donde se describe paso a paso el patrón que debe ser seguido desde el inicio hasta el final de la misma para cumplir cada objetivo específico.

En el cuarto capítulo se expondrán los resultados obtenidos de los ensayos y estudios necesarios para cumplir con los objetivos de este trabajo así como también los análisis de tales ensayos y estudios. Además se establecerán las comparaciones necesarias entre los resultados obtenidos para lograr establecer (mediante el análisis causa-efecto) de manera adecuada las conclusiones y recomendaciones.

Finalmente, en el quinto capítulo se expondrán las conclusiones y recomendaciones que se puedan establecer, sustentadas en los resultados experimentales y sus respectivos análisis.

## *Resumen*

---

En el estudio se presentó la susceptibilidad a la corrosión del proceso de soldadura TIG bajo tres valores diferentes de intensidad de corriente, baja (60-70A), media (70-80A) y alta (80-90A), en juntas soldadas a tope de acero ASTM A178 grado A, utilizando electrodo EWTh-2 de 2,4 mm de diámetro, gas Argón al 99,99% y a una velocidad de avance de 200 mm/min, mediante la determinación del cambio en las propiedades mecánicas. Este tipo de soldadura se realiza con frecuencia en las aplicaciones del material de estudio; intercambiadores de calor, calderas pirotubulares, tuberías de vapor entre otros. El material se endureció en la soldadura y sus adyacencias debido a la formación de martensita. Para acelerar el proceso de corrosión se realizaron ensayos en una cámara de niebla salina según la norma ASTM B117 – 07, con tres diferentes períodos de exposición. En todas las superficies expuestas al medio corrosivo se manifestó corrosión de tipo uniforme o generalizada lo que ocasionó pérdida de peso y por consiguiente una reducción en el área transversal. En las uniones soldadas se registró corrosión localizada por grietas debido a que no hubo suficiente penetración del cordón de soldadura, quedando una ranura (zona donde no hubo fusión) por la que penetró el fluido corrosivo debilitando la soldadura. Las propiedades mecánicas más afectadas por la corrosión fueron la resistencia a la tracción y el porcentaje de elongación; ambos disminuyeron.

# Índice general

<b>Índice general</b>	<b>i</b>	
<b>Índice de figuras</b>	<b>v</b>	
<b>Índice de tablas</b>	<b>ix</b>	
<b>Introducción</b>	<b>xiii</b>	
<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>El Problema</b>	<b>1</b>
1.1	Situación problemática	1
1.2	Objetivos	3
1.2.1	<i>Objetivo General</i>	3
1.2.2	<i>Objetivos Específicos</i>	3
1.3	Justificación	4
1.4	Alcance	4
1.5	Limitaciones	5
1.6	Antecedentes	5
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>Marco Teórico</b>	<b>11</b>
2.1	Aceros al carbono	11
2.1.1	<i>Definición</i>	11
2.1.2	<i>Clasificación de los aceros</i>	11
2.1.3	<i>Material en Estudio (ASTM A 178)</i>	14
2.1.3.1	Composición química del acero ASTM A178	14
2.1.3.2	Propiedades mecánicas del acero ASTM A178	14
2.1.3.3	Aplicaciones	15

2.2	Manufactura	15
2.2.1	<i>Definición</i>	15
2.2.2	<i>Procesos de manufactura</i>	16
2.3	Procesos de Soldadura	18
2.3.1	<i>Definición</i>	18
2.3.2	<i>Clasificación general de los tipos de soldadura</i>	18
2.3.3	Soldadura por arco eléctrico	20
2.3.3.1	Soldadura por arco en atmosfera inerte	20
2.4	Procesos de Soldadura TIG	22
2.4.1	<i>Introducción Histórica</i>	22
2.4.2	<i>Descripción Preliminar</i>	22
2.4.3	<i>Equipo Básico para TIG ó GTAW</i>	24
2.4.4	<i>Ventajas, limitaciones y problemas potenciales para TIG o GTAW</i>	30
2.5	Corrosión	31
2.5.1	<i>Descripción preliminar</i>	31
2.5.2	<i>Mecanismos Electroquímicos de la Corrosión</i>	34
2.5.3	<i>Definición de Ánodo y Cátodo</i>	35
2.5.4	<i>Termodinámica de la Corrosión Acuosa</i>	37
2.5.5	<i>Efecto del Oxígeno Disuelto</i>	39
2.5.6	<i>Efecto de la Temperatura</i>	40
2.5.7	<i>Efecto del ph</i>	40
2.5.8	<i>Clasificación de la Corrosión</i>	41
2.5.8.1	<i>Corrosión Uniforme (Generalizada)</i>	41
2.5.8.2	<i>Corrosión Galvánica</i>	42
2.5.8.3	<i>Corrosión por Grietas</i>	42
2.5.8.4	<i>Corrosión por Picaduras</i>	43
2.5.8.5	<i>Corrosión Intergranular</i>	43
2.5.8.6	<i>Corrosión por Erosión</i>	43
2.5.8.7	<i>Corrosión por Tensión</i>	43
2.5.8.8	<i>Corrosión Salina Neutra</i>	44
2.5.8.9	<i>Corrosión Salina Ácida</i>	44
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>Metodología</b>	<b>45</b>
3.1	Nivel de la Investigación	45
3.2	Diseño de la Investigación	46
3.3	Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	46
3.4	Técnicas de Procesamiento de Datos	46
3.5	Adquisición del material de estudio	47
3.6	Elaboración de las probetas	47
3.6.1	<i>Diseño y realización del corte del material de Estudio</i>	47
3.6.1.1	Material de probetas para tracción	47
3.6.1.2	Material de probetas para ensayos de dureza y metalografía	48

3.6.2	<i>Proceso de elaboración de las juntas soldadas</i>	49
3.6.2.1	<i>Equipos utilizados</i>	50
3.6.2.2	<i>Materiales utilizados</i>	51
3.6.2.3	<i>Parámetros de las soldaduras</i>	52
3.6.3	<i>Elaboración de las probetas de tracción</i>	56
3.6.4	<i>Elaboración de las probetas de dureza y metalografía</i>	58
3.7	<b>Procedimientos Experimentales</b>	59
3.7.1	<i>Ensayo de Corrosión</i>	59
3.7.1.1	<i>Preparación Superficial de la Muestra</i>	60
3.7.1.2	<i>Mediciones y Pesaje de la Muestra</i>	61
3.7.1.3	<i>Preparación de la Solución Salina</i>	61
3.7.1.4	<i>Períodos de Exposición</i>	61
3.7.1.5	<i>Evaluación de la corrosión</i>	62
3.7.2	<i>Ensayo de Tracción</i>	62
3.7.2.1	<i>Equipos utilizados</i>	63
3.7.2.2	<i>Procedimientos del ensayo</i>	63
3.7.3	<i>Ensayo de Metalografía</i>	66
3.7.3.1	<i>Equipos y materiales utilizados</i>	66
3.7.3.2	<i>Procedimientos del ensayo</i>	68
3.7.4	<i>Ensayo de Microdureza</i>	69
3.7.4.1	<i>Equipos utilizados</i>	70
3.7.4.2	<i>Procedimientos del ensayo</i>	70
3.7.5	<i>Análisis de los Datos Obtenidos</i>	71
<b>CAPÍTULO 4</b>	<b>Resultado y Análisis de Resultados</b>	<b>73</b>
4.1	<i>Caracterización del metal base</i>	73
4.1.1	<i>Ensayos de tracción</i>	73
4.1.2	<i>Ensayos de dureza</i>	77
4.1.3	<i>Ensayos de metalografía</i>	78
4.2	<i>Caracterización del material soldado</i>	80
4.2.1	<i>Ensayos de tracción</i>	80
4.2.1.1	<i>Probetas soldadas con intensidad de corriente baja</i>	81
4.2.1.2	<i>Probetas soldadas con intensidad de corriente media</i>	82
4.2.1.3	<i>Probetas soldadas con intensidad de corriente alta</i>	83
4.2.1.4	<i>Análisis de los ensayos de tracción</i>	84
4.2.2	<i>Ensayos de dureza</i>	85
4.2.3	<i>Ensayos de metalografía</i>	90
4.3	<i>Ensayos de corrosión</i>	92
4.3.1	<i>Pérdida de peso en las probetas de tracción</i>	94
4.4	<i>Ensayos de tracción</i>	96
4.4.1	<i>Probetas soldadas con intensidad de corriente baja</i>	96

4.4.1.1	<i>Período de exposición de dos días</i>	96
4.4.1.2	<i>Período de exposición de cuatro días</i>	97
4.4.1.3	<i>Período de exposición de siete días</i>	98
4.4.1.4	Análisis de los ensayos de tracción	99
4.4.2	<i>Probetas soldadas con intensidad de corriente media</i>	99
4.4.2.1	<i>Período de exposición de dos días</i>	99
4.4.2.2	<i>Período de exposición de cuatro días</i>	101
4.4.2.3	<i>Período de exposición de siete días</i>	102
4.4.2.4	Análisis de los ensayos de tracción	104
4.4.3	<i>Probetas soldadas con intensidad de corriente alta</i>	106
4.4.3.1	<i>Período de exposición de dos días</i>	106
4.4.3.2	<i>Período de exposición de cuatro días</i>	107
4.4.3.3	<i>Período de exposición de siete días</i>	108
4.4.3.4	Análisis de los ensayos de tracción	109
4.5	Ensayos de dureza	110
4.5.1	<i>Muestras soldadas con intensidad de corriente baja</i>	110
4.5.1.1	<i>Período de exposición de dos días</i>	110
4.5.1.2	<i>Período de exposición de cuatro días</i>	112
4.5.1.3	<i>Período de exposición de siete días</i>	114
4.5.1.4	Análisis de los ensayos de dureza	116
4.5.2	<i>Muestras soldadas con intensidad de corriente media</i>	117
4.5.2.1	<i>Período de exposición de dos días</i>	117
4.5.2.2	<i>Período de exposición de cuatro días</i>	119
4.5.2.3	<i>Período de exposición de siete días</i>	120
4.5.2.4	Análisis de los ensayos de dureza	122
4.5.3	<i>Muestras soldadas con intensidad de corriente alta</i>	124
4.5.3.1	<i>Período de exposición de dos días</i>	124
4.5.3.2	<i>Período de exposición de cuatro días</i>	125
4.5.3.3	<i>Período de exposición de siete días</i>	126
4.5.3.4	Análisis de los ensayos de dureza	127
4.6	Ensayos de metalografía	128
4.7	Ensayos de Macroscopía	133
<b>CAPÍTULO 5</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>135</b>
5.1	Conclusiones	135
5.1	Recomendaciones	137
	<b>Referencias Bibliográficas</b>	<b>139</b>

# Índice de figuras

<b>FIGURAS</b>	<b>Pág.</b>
1.1. Tubería de caldera corroída.	2
2.1. Clasificación de los aceros.	13
2.2. Clasificación de procesos de manufactura.	17
2.3. Diagrama de la clasificación de la soldadura.	19
2.4. Soldadura por arco eléctrico.	20
2.5. Soldadura con electrodo refractario (método TIG).	21
2.6. Soldadura con electrodo consumible (método MIG y MAG).	21
2.7. Esquema de un sistema para soldadura de arco TIG.	25
2.8. Ilustración de las dos posibles polaridades.	26
2.9. Esquema de un soplete para soldadura TIG.	27
2.10. Formas posibles para electrodos de tungsteno.	28
2.11. Ciclo que sigue el hierro hasta volver a su estado estable.	34
2.12. Dirección de la corriente positiva en una pila seca.	36
3.1. Representación de los anillos para las probetas de tracción obtenidos mediante el corte de los tubos.	48
3.2. Representación de los anillos para las probetas de dureza y metalografía obtenidos mediante el corte de los tubos.	49
3.3. Máquina para soldadura automática utilizada.	50
3.4. Pinzas orbitales utilizadas.	51
3.5. Esquema de los sectores imaginarios en los que se dividió la circunferencia.	53
3.6. Localización del corte para la probeta de tracción longitudinal a la tubería.	57
3.7. Esquema de la probeta soldada para tracción.	57
3.8. Dimensiones para las probetas de tracción.	58
3.9. Dimensiones para las probetas de dureza y metalografía.	59
3.10. Máquina de ensayo universal en materiales.	60
3.11. Máquina universal de ensayos mecánicos utilizada.	63

3.12. Equipos utilizados para la preparación de las probetas.	67
3.13. Microscopio electrónico.	68
3.14. Zonas originadas luego del proceso de soldadura.	70
3.15. Microdurómetro utilizado en los ensayos.	70
4.1. Gráfica de esfuerzo-deformación ingenieril de dos probetas para la caracterización.	73
4.2. Gráfica de esfuerzo-deformación ingenieril con líneas de relación de la Ley de Hooke.	74
4.3. Gráfica de Microdureza de cada tubo.	77
4.4. Microscopía del primer tubo.	78
4.5. Microscopía del segundo tubo.	79
4.6. Microscopía del tercer tubo.	79
4.7. Microscopía del cuarto tubo.	79
4.8. Microscopía del quinto tubo.	80
4.9. Microscopía a 500X del acero ASTM A178	80
4.10. Ensayos de tracción de las probetas soldadas con intensidad de corriente baja.	81
4.11. Ensayos de tracción de las probetas soldadas con intensidad de corriente media.	82
4.12. Ensayos de tracción de las probetas soldadas con intensidad de corriente alta.	83
4.13. Gráfica de comparación de esfuerzos obtenidos a través del ensayo de tracción.	84
4.14. Gráfica de comparación del porcentaje de reducción de área y del porcentaje de elongación obtenido a través del ensayo de tracción.	85
4.15. Gráfica de Microdureza de muestras soldadas con intensidad de corriente baja.	87
4.16. Gráfica de Microdureza de muestras soldadas con intensidad de corriente media.	88
4.17. Gráfica de Microdureza de muestras soldadas con intensidad de corriente alta.	89
4.18. Microscopía de las muestras soldadas con intensidad de corriente baja.	90
4.19. Microscopía de las muestras soldadas con intensidad de corriente media.	91
4.20. Microscopía de las muestras soldadas con intensidad de corriente alta.	91
4.21. Pesaje de una probeta antes de ser sometida a corrosión.	92
4.22. Disposición de las probetas en la cámara de niebla salina estándar	93
4.23. Resultado de las muestras expuestas a corrosión durante 7 días.	94
4.24. Pérdida de peso de las muestras para tracción.	95
4.25. Ensayos de tracción de las probetas soldadas con intensidad de corriente baja sometidas a corrosión durante dos días.	96

4.26. Ensayos de tracción de las probetas soldadas con intensidad de corriente baja sometidas a corrosión durante cuatro días.	97
4.27. Ensayos de tracción de las probetas soldadas con intensidad de corriente baja sometidas a corrosión durante siete días.	99
4.28. Ensayos de tracción de las probetas soldadas con intensidad de corriente media sometidas a corrosión durante dos días.	100
4.29. Ensayos de tracción de las probetas soldadas con intensidad de corriente media sometidas a corrosión durante cuatro días.	101
4.30. Ensayos de tracción de las probetas soldadas con intensidad de corriente media sometidas a corrosión durante siete días.	103
4.31. Gráfica de comparación de esfuerzos obtenidos a través del ensayo de tracción.	104
4.32. Gráfica de comparación del porcentaje de reducción de área y del porcentaje de elongación obtenido a través del ensayo de tracción.	105
4.33. Ensayos de tracción de las probetas soldadas con intensidad de corriente alta sometidas a corrosión durante dos días.	106
4.34. Ensayos de tracción de las probetas soldadas con intensidad de corriente alta sometidas a corrosión durante cuatro días.	107
4.35. Ensayos de tracción de las probetas soldadas con intensidad de corriente alta sometidas a corrosión durante siete días.	108
4.36. Gráfica de comparación de esfuerzos obtenidos a través del ensayo de tracción.	109
4.37. Gráfica de comparación del porcentaje de reducción de área y del porcentaje de elongación obtenido a través del ensayo de tracción.	110
4.38. Gráfica de dureza - Zona de estudio para las muestras soldadas con intensidad de corriente baja sometidas a corrosión durante dos días.	112
4.39. Gráfica de dureza - Zona de estudio para las muestras soldadas con intensidad de corriente baja sometidas a corrosión durante cuatro días.	113
4.40. Gráfica de dureza - Zona de estudio para las muestras soldadas con intensidad de corriente baja sometidas a corrosión durante siete días.	115
4.41. Gráfica de comparación de los valores de dureza obtenidos para las muestras de intensidad de corriente baja.	116
4.42. Gráfica de dureza - Zona de estudio para las muestras soldadas con intensidad de corriente media sometidas a corrosión durante dos días.	118
4.43. Gráfica de dureza - Zona de estudio para las muestras soldadas con intensidad de corriente media sometidas a corrosión durante cuatro días.	120
4.44. Gráfica de dureza - Zona de estudio para las muestras soldadas con intensidad de corriente media sometidas a corrosión durante	121

siete días.	
4.45. Gráfica de comparación de los valores de dureza obtenidos para las muestras de intensidad de corriente media.	122
4.46. Gráfica de dureza - Zona de estudio para las muestras soldadas con intensidad de corriente alta sometidas a corrosión durante dos días.	124
4.47. Gráfica de dureza - Zona de estudio para las muestras soldadas con intensidad de corriente alta sometidas a corrosión durante cuatro días.	125
4.48. Gráfica de dureza - Zona de estudio para las muestras soldadas con intensidad de corriente alta sometidas a corrosión durante siete días.	126
4.49. Gráfica de comparación de los valores de dureza obtenidos para las muestras de intensidad de corriente alta.	127
4.50. Microscopía (sin ataque) a 1000X de la sección transversal de una muestra expuesta a corrosión durante cuatro días.	128
4.51. Microscopía (sin ataque) a 1000X de la sección transversal de una muestra expuesta a corrosión durante siete días.	129
4.52. Microscopía a 100X (sin ataque) de la sección transversal de una muestra soldada con intensidad de corriente media expuesta a corrosión durante siete días.	130
4.53. Microscopía a 100X (sin ataque) de la sección transversal de una muestra soldada con intensidad de corriente alta expuesta a corrosión durante siete días.	131
4.54. Microscopía a 400X de la sección transversal de una muestra expuesta a corrosión durante cuatro días.	131
4.55. Microscopía a 400X de la sección transversal de una muestra expuesta a corrosión durante siete días.	132

# Índice de tablas

<b>TABLAS</b>	<b>Pág</b>
2.1. Composición química del material en estudio.	14
2.2. Propiedades mecánicas del material en estudio.	14
2.3. Gas inerte para TIG o GTAW.	23
2.4. Características de corriente para soldadura TIG de diversos Metales.	27
2.5. Códigos de electrodos para TIG según AWS.	28
2.6. Parámetros aproximados para la soldadura TIG en aceros al carbono y de baja aleación, para posición plana en juntas a tope, juntas solapadas y filetes horizontales.	29
3.1. Características de la máquina de soldar utilizada.	50
3.2. Valores de corriente para cada sector con intensidad de corriente baja.	54
3.3. Valores de corriente para cada sector con intensidad de corriente media.	54
3.4. Valores de corriente para cada sector con intensidad de corriente alta.	54
3.5. Parámetros de la soldadura.	55
3.6. Características de la Cámara de niebla salina estándar.	60
4.1. Propiedades mecánicas del primer tubo.	75
4.2. Propiedades mecánicas del resto de los tubos.	75
4.3. Valores promedio de las propiedades mecánicas del material.	76
4.4. Pruebas de dureza de los tubos.	77
4.5. Propiedades mecánicas de las probetas soldadas con intensidad de corriente baja.	82
4.6. Propiedades mecánicas de las probetas soldadas con intensidad de corriente media.	83

4.7. Propiedades mecánicas de las probetas soldadas con intensidad de corriente alta.	84
4.8. Resultados de pruebas de dureza para muestras soldadas con intensidad de corriente baja.	86
4.9. Resultados de pruebas de dureza para muestras soldadas con intensidad de corriente media.	87
4.10. Resultados de pruebas de dureza para muestras soldadas con intensidad de corriente alta.	88
4.11. Pérdida de peso en las probetas de tracción.	95
4.12. Propiedades mecánicas de las probetas de tracción soldadas con intensidad de corriente baja sometidas a corrosión durante dos días.	97
4.13. Propiedades mecánicas de las probetas de tracción soldadas con intensidad de corriente baja sometidas a corrosión durante cuatro días.	98
4.14. Propiedades mecánicas de las probetas de tracción soldadas con intensidad de corriente baja sometidas a corrosión durante siete días.	99
4.15. Propiedades mecánicas de las probetas de tracción soldadas con intensidad de corriente media sometidas a corrosión durante dos días.	101
4.16. Propiedades mecánicas de las probetas de tracción soldadas con intensidad de corriente media sometidas a corrosión durante cuatro días.	102
4.17. Propiedades mecánicas de las probetas de tracción soldadas con intensidad de corriente media sometidas a corrosión durante siete días.	103
4.18. Propiedades mecánicas de las probetas de tracción soldadas con intensidad de corriente alta sometidas a corrosión durante dos días.	107
4.19. Propiedades mecánicas de las probetas de tracción soldadas con intensidad de corriente alta sometidas a corrosión durante cuatro días.	108
4.20. Propiedades mecánicas de las probetas de tracción soldadas con intensidad de corriente alta sometidas a corrosión durante siete días.	109
4.21. Resultados de pruebas de dureza para muestras soldadas con intensidad de corriente baja sometidas a corrosión durante dos días.	111
4.22. Resultados de pruebas de dureza para muestras soldadas con intensidad de corriente baja sometidas a corrosión durante cuatro días.	112
4.23. Resultados de pruebas de dureza para muestras soldadas con intensidad de corriente baja sometidas a corrosión durante siete días.	114

4.24. Resultados de pruebas de dureza para muestras soldadas con intensidad de corriente media sometidas a corrosión durante dos días.	117
4.25. Resultados de pruebas de dureza para muestras soldadas con intensidad de corriente media sometidas a corrosión durante cuatro días.	119
4.26. Resultados de pruebas de dureza para muestras soldadas con intensidad de corriente media sometidas a corrosión durante siete días.	121
4.27. Resultados de pruebas de dureza para muestras soldadas con intensidad de corriente alta sometidas a corrosión durante dos días.	124
4.28. Resultados de pruebas de dureza para muestras soldadas con intensidad de corriente alta sometidas a corrosión durante cuatro días.	125
4.29. Resultados de pruebas de dureza para muestras soldadas con intensidad de corriente alta sometidas a corrosión durante siete días.	126

# ***Conclusiones y Recomendaciones***

---

---

## **CONCLUSIONES**

- Las propiedades mecánicas del material adquirido corresponden con las características del material en estudio.
- Se manifestó corrosión por grietas en las ranuras (donde no hubo fusión por la poca penetración) de las probetas soldadas con intensidad de corriente baja y media.
- El efecto corrosivo en el material se manifestó principalmente en forma de corrosión uniforme (generalizada) en todas las superficies expuestas directamente al medio corrosivo.
- A medida que aumenta el período de corrosión, la franja de óxido en la superficie del material se hace más profunda.
- La microestructura del material antes y después de la corrosión resultó ser la misma en cuanto a fases (microestructura).

- La propiedad de dureza no se vio afectada por la exposición a la corrosión.
- Las propiedades mecánicas obtenidas del ensayo de tracción disminuyeron debido a la pérdida de masa que sufrieron las probetas durante la corrosión, lo que redujo el área transversal de las mismas.
- Las mejores propiedades mecánicas tanto en el ensayo de tracción como en el de microdureza se manifestaron en las probetas soldadas con el valor de intensidad de corriente alto; 80-90 A, por lo que este se establece como el valor óptimo (entre los tres estudiados) de este parámetro, para este proceso de soldadura.

## **RECOMENDACIONES**

- Aumentar el periodo de exposición en los ensayos de corrosión.
- Realizar las juntas soldadas utilizando intensidades de corriente mayores.
- Realizar varias pasadas en la junta soldada para mejorar la penetración
- Variar otros parámetros en la soldadura, por ejemplo, el flujo de gas, velocidad de avance, el tipo de corriente, entre otros.
- Realizar el estudio del efecto de corrosión en otros procesos de soldadura.

# *REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS*

---

- Askeland (1998). Ciencia e Ingeniería de los Materiales, tercera edición, INTERNATIONAL THOMSON EDITORES.
- ASM Metals HANDBOOK Volume 1: Properties and Selection: Iron Steels and High performance alloys (1993).
- ASM Metals HANDBOOK Volume 6: Welding, Brazing and Soldari (1993).
- ASM Metals HANDBOOK Volume 9: Metallography and Microstruct (1192).
- ASM Metals HANDBOOK Volume 13A: Corrosion Fundamentals, Testing, and Protection (2003).
- ASTM A 178, Standard Specification for Electric-Resistance-Welded Carbon Steel and Carbon-Manganese Steel Boiler and Superheater Tubes.
- ASTM B 117 – 07, Standar Practice for Operating Salt Spray (fog) Apparatus (2007).

- ASTM E 3 – 01, Guide for Preparation of Metallographic Specimens (2001).
- ASTM E 8M – 04, Standar Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, (2004).
- ASTM G 1 – 03, Standar Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens (2003).
- ASTM G 50 – 76, Standard Practice for Conducting Atmospheric Corrosion Tests on Metals (Reapproved 1997).
- Ávila y Genescá (1987). Más allá de la Herrumbre I. Biblioteca digital, La Ciencia Para todos, FONDO DE CULTURA ECONOMICA, S. A. DE C. V.
- AWS B4.0 Standard Methods for Mechanical Testing of Welds (1998).
- Barrantes, Campos, y Gutiérrez (2006) Sistemas De Control En Calderas De Vapor. Universidad De Costa Rica, Facultad De Ingeniería.
- Castro (2006). Manual de Prácticas del Laboratorio de Materiales, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, UNIVERSIDAD DE CARABOBO.
- Catálogo ESAB, 2009.
- Dantas, Araujo, De Freitas (2008). Corrosion of materials used in the solar energy industry. Anti – Corrosion Methods and Materials, 55 (3), 150-155. ProQuest Science Journals database. (Document ID: 1484418051).
- Groover (1997). FUNDAMENTOS DE MANUFACTURA MODERNA, Materiales, Procesos y Sistemas, primera edición en español, Editorial Prentice Hall.

- Guthrie, Battat y Grethlein (2001). *Accelerated Corrosion Testing*, Material ease AMPTIAC, Rome, NY.
- Martínez y Azuaga (1997). *Medición del módulo de elasticidad de Young*, Laboratorio IV – Dpto. de Física – UBA.
- M. Vogt (1905). *Causas De La Corrosión En Las Calderas*, Revista De Obras Públicas. Volumen 1542 (numero 53) tomo II.
- Pacheco, Chávez y Paredes (2003). *Causas de Fallas en Calderas*. Edición Especial ESPOLCiencia Revista Tecnológica, pp. 55-65.
- Pender (2001). *SOLDADURA*, tercera edición en español, Editorial McGraw-Hill, pp. 162-174.
- Quero y Tabares (2004). *ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS ACEROS INOXIDABLES AISI 304 Y AISI 316 SOMETIDOS A CONDICIONES DE FATIGA EN MEDIO CORROSIVO*. Trabajo de Grado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, pp. 45-55, 57-67.
- Rezakhani (2007). *Corrosion behaviors of several thermal spray coatings used on boiler tubes at elevated temperatures*.
- Rodríguez (2001). *MANUAL DE SOLDADURA*, Soldadura Eléctrica, MIG y TIG, 1era edición, Librería y Editorial ALSINA.
- Tecnología industrial (2008). *Procedimiento de unión: Soldadura*. I.E.S. “Cristóbal de Monroy”. Dpto. de Tecnología. Procedimiento de unión.
- Terán, Tovar, Portocarrero, y De Sánchez (2004). *ESTUDIO DE LA CORROSION PRODUCIDA EN ACEROS INOXIDABLES 304 EN PROCESOS DE SOLDADURA*, Dyna, Universidad de Nacional de Colombia, volumen 71 (numero 144), pp. 61-66
- Uzcátegui (1973). *CORROSIÓN*, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, UNIVERSIDAD DE CARABOBO.

- Villarroel, Reyes, García, Crespo, Subero y Vargas (1989). Materiales Metálicos. Ensayo de Dureza Vickers. (1ra Revisión) COVENIN 616-89.
- Yépez y Affaqui (2009). Procedimiento para el funcionamiento de la Cámara de Niebla Salina, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, Laboratorio de Materiales, UNIVERSIDAD DE CARABOBO.
- Zalazar (2001). SOLDADURA POR ARCO CON ELECTRODO DE TUNGSTENO NO CONSUMIBLE, Laboratorio de metalografía y soldadura, UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE, Cuaderno F.I. N° 2-2001.

**SOLICITUD DEL PROYECTO DE GRADO**

**TITULO DEL TRABAJO:**

Estudio de la Corrosión Producida en Aceros ASTM 178 en Procesos de Soldadura TIG

FECHA DE APROBACIÓN DE TG-II: 22/07/2008

FECHA DE EX. FINAL: \_\_\_\_\_

FECHA DE ENTREGA DE EJEMPLARES DEFINITIVOS A  
DIRECCIÓN DE ESCUELA: \_\_\_\_\_

**SINOPSIS:**

En el estudio se presentó la susceptibilidad a la corrosión del proceso de soldadura TIG bajo tres valores diferentes de intensidad de corriente, baja (60-70A), media (70-80A) y alta (80-90A), en juntas soldadas a tope de acero ASTM A178 grado A, utilizando electrodo EWTh-2 de 2,4 mm de diámetro, gas Argón al 99,99% y a una velocidad de avance de 200 mm/min, mediante la determinación del cambio en las propiedades mecánicas. Este tipo de soldadura se realiza con frecuencia en las aplicaciones del material de estudio; intercambiadores de calor, calderas pirotubulares, tuberías de vapor entre otros. El material se endureció en la soldadura y sus adyacencias debido a la formación de martensita. Para acelerar el proceso de corrosión se realizaron ensayos en una cámara de niebla salina según la norma ASTM B117 – 07, con tres diferentes períodos de exposición. En todas las superficies expuestas al medio corrosivo se manifestó corrosión de tipo uniforme o generalizada lo que ocasionó pérdida de peso y por consiguiente una reducción en el área transversal. En las uniones soldadas se registró corrosión localizada por grietas debido a que no hubo suficiente penetración del cordón de soldadura, quedando una ranura (zona donde no hubo fusión) por la que penetró el fluido corrosivo debilitando la soldadura. Las propiedades mecánicas más afectadas por la corrosión fueron la resistencia a la tracción y el porcentaje de elongación; ambos disminuyeron.

**CEDULA DE IDENTIDAD**

18.781.077

**NOMBRES**

Ana Montaña

**FIRMA**

\_\_\_\_\_

18.686.359

Manuel Girón

\_\_\_\_\_

**PROFESOR GUÍA:** Franklin Camejo

\_\_\_\_\_

**JURADO:** \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**JURADO:** \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_