



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



# EVALUACIÓN DE LAS JUNTAS SOLDADAS DEL ACERO ASTM A-283 GR B POR EL PROCESO DE SOLDADURA GTAW Y SMAW EXPUESTAS A LA CORROSIÓN POR UN AMBIENTE MARINO

Molina Márquez, Marvi Gabriela.  
Rocha Rondón, Carolina Beatriz.

Naguanagua, 11 de noviembre de 2010





UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



## Evaluación de las juntas soldadas del acero ASTM A-283 GR B por el proceso de soldadura GTAW y SMAW expuestas a la corrosión por un ambiente marino

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

**Tutor académico:**  
*Ing. Luis Sidorovas*

**Autores:**  
Molina Márquez, Marvi Gabriela.  
Rocha Rondón, Carolina Beatriz.

Naguanagua, 11 de noviembre de 2010



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



## CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Quienes suscriben, Miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para examinar la Tesis de Pregrado titulada “*Evaluación de las juntas soldadas del acero ASTM A-283 GR B por el proceso de soldadura GTAW y SMAW expuestas a la corrosión por un ambiente marino*”, presentada por los bachilleres: **Marvi G. Molina M.** y **Carolina B. Rocha R.**, portadores de la Cédula de Identidad N°: 19.001.389 y 18.434.345, respectivamente; hacemos constar que hemos revisado y aprobado el mencionado trabajo.

\_\_\_\_\_  
Prof. Tutor, *Ing. Luis Sidorovas*  
*Presidente del jurado*

\_\_\_\_\_  
Prof. Jurado 1, *Ing. Donato Romanello*  
*Miembro del jurado*

\_\_\_\_\_  
Prof. Jurado 2, *Ing. Franklin Camejo*  
*Miembro del jurado*

En Naguanagua a los 11 días del mes de octubre de 2010

# *Agradecimientos*

---

Quiero expresar, sin tomar en consideración un orden específico, mi más sincero agradecimiento a mi tutor, el Profesor Luis Sidorovas, por sus consejos, guiatura y sugerencias oportunas durante el desarrollo de este trabajo de investigación. De igual manera agradezco al Ing. Roberto Torres, quien en todo momento, durante el desarrollo de la investigación, estuvo atento y prestando toda su colaboración, orientación, guiatura y dirección académica para la realización de este estudio.

# *Resumen*

---

---

En el presente estudio se evaluó el efecto de la corrosión sobre las juntas soldadas bajos los procesos de soldadura GTAW y SMAW, empleando electrodos ER309 (diámetro 1/8) y E309-16 (diámetro 5/32), respectivamente y gas argón al 100%. El material base fue un acero estructural de baja aleación ASTM A 283 Gr B, el cual es empleado a nivel industrial para la fabricación de tanques y elementos estructurales en general. Para determinar los efectos de la corrosión se determinaron los cambios en las propiedades mecánicas y pérdida de peso en las muestras, como especifica la norma ASTM B 117 – 07a, la cual corresponde al Ensayo de Cámara de Niebla Salina, equipo que se utilizó para acelerar el proceso natural de la corrosión. En este ensayo se sometieron las muestras soldadas a periodos de exposición de 48 hr, 96 hr y 196 hr. Se obtuvo como resultado un aumento en la pérdida de peso de las muestras a medida que el periodo de exposición se incrementaba. Las muestras presentaron corrosión generalizada sobre toda la superficie, así como también zonas de corrosión localizada, la cuales aumentaban a medida que aumentaba el periodo de exposición. Por otro lado las propiedades mecánicas obtenidas por los ensayos de tracción, dureza e impacto, no vieron afectadas significativamente una vez sometidas a las probetas a los periodos de exposición. Del mismo modo se obtuvo que el cordón de soldadura no se vió afectado por la corrosión. Lo anterior permite concluir que es necesario exponer al material durante un periodo de exposición mayor para obtener variaciones más significativas.

# *Índice general*

<b>Índice general</b>	<b>I</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>vi</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>Xii</b>
<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1 EL Problema</b>	
1.1 Situación problemática	<b>3</b>
1.2 Objetivos	<b>5</b>
1.2.1 Objetivo General	<b>5</b>
1.2.2 Objetivos Específicos	<b>6</b>
1.3 Justificación	<b>6</b>
1.4 Alcance	<b>7</b>
1.5 Limitaciones	<b>8</b>
<b>CAPÍTULO 2 Marco Teórico</b>	
2.1 Antecedentes	<b>9</b>
2.2 Bases teóricas	<b>11</b>
2.2.1 Aceros	<b>12</b>
2.2.1.1 Clasificación de los Aceros	
2.2.1.2 Material de estudio (ASTM A 283 grado B)	<b>15</b>
2.2.1.3 Aplicaciones del material de estudio	<b>16</b>
2.2.2 Proceso de Soldadura	<b>16</b>
2.2.2.1. Definición	<b>16</b>

2.2.2.2	Clasificación de los procesos de soldadura	17
2.2.3.	Procesos de soldadura por arco eléctrico	21
2.2.3.1	Soldadura por Arco de Gas Tungsteno (GTAW)	21
2.2.3.2	Soldadura por Arco metálico con electrodos Revestidos (SMAW)	28
2.2.4	Corrosión	36
2.2.4.1	Reacciones de oxido reducción	37
2.2.4.2	Energía libre	38
2.2.4.3	Efecto de la temperatura	40
2.4.4	Efecto del pH	40
2.2.4.5	Clasificación de la corrosión	41
2.2.4.6	Corrosión Atmosférica	44
2.2.4.7	Corrosión por agua de mar	47
2.2.5	Cámara de Niebla Salina	47
2.2.6.	Ensayo de tracción	51
2.2.7	Ensayo de Metalografía	54
2.2.8	Ensayo de Impacto	55
2.2.9	Ensayo de Microdureza Vickers	55

### **CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA**

3.1.	Nivel de la Investigación	57
3.2.	Diseño de la Investigación	58
3.3.	Técnicas e instrumentos de la recolección de datos	58
3.4.	Técnicas de procesamiento de datos	58
3.5.	Adquisición del material de estudio	59
3.6.	Elaboración de las probetas	59
3.6.1	Diseño y realización del corte del material de estudio	59
3.6.1.1	Material de probetas para ensayo de tracción	59
3.6.1.2	Material de probetas para ensayo de impacto	60

3.6.1.3 Material de probetas para ensayos de dureza y metalografía	60
3.6.2 Proceso de elaboración de juntas soldadas	60
3.6.2.1 Equipos utilizados	60
3.6.2.2 Materiales utilizados	61
3.6.2.3 Parámetros de la soldadura	61
3.6.3. Elaboración de las probetas de tracción	62
3.6.4. Elaboración de las probetas de dureza y metalografía	65
3.6.5. Elaboración de probetas para el ensayo de impacto	65
3.7. Procedimiento Experimental	66
3.7.1 Ensayo de Corrosión	66
3.7.1.1. Preparación Superficial de la muestra	67
3.7.1.2 Mediciones y pesajes de las muestras	67
3.7.1.3 Preparación de la solución salina	67
3.7.1.4 Periodos de exposición	68
3.7.1.5 Evaluación de las muestras	68
3.7.2 Ensayo de Tracción	69
3.7.2.1 Equipos y materiales utilizados	69
3.7.2.2 Procedimiento del ensayo	70
3.7.3. Ensayo de Metalografía	71
3.7.3.1. Equipos y materiales utilizados	71
3.7.3.2 Procedimientos del ensayo	72
3.7.4 Ensayo de Impacto	73
3.7.4.1 Equipos y materiales utilizados	73
3.7.4.2. Procedimiento del ensayo	73
3.7.5 Ensayo de Microdureza	74
3.7.5.1 Equipos y materiales utilizados	75
3.7.5.2. Procedimientos del ensayo	75

## **CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS**

4.1. Composición química del Material Base	77
4.2. Caracterización del Material Soldado	78
4.2.1. Ensayo de Metalografía	78
4.2.1.1. Macroscopía	78
4.2.1.2. Microscopia	80
4.2.2. Ensayo de tracción	84
4.2.3. Ensayos de Microdureza	86
4.2.4. Ensayo de Impacto	90
4.3. Ensayo de Corrosión	91
4.3.1 Pérdida de peso en probetas de tracción	93
4.3.2. Pérdida de peso en probetas de Metalografía/Dureza	93
4.4 Ensayos de Metalografía	94
4.4.1 Probetas sometidas a un periodo de 48 hr.	94
4.1.1.1. Macroscopia	94
4.1.1.2. Microscopia	95
4.4.2 Probetas sometidas a un periodo de 96 hr.	101
4.1.2.1 Macroscopia	101
4.1.2.2 Microscopia	102
4.4.3 Probetas sometidas a un periodo de 196 hr.	107
4.1.3.1 Macroscopia	107
4.1.3.2 Microscopia	108
4.4.4 Análisis de los ensayos de Metalografía	113
4.5 Ensayo de Tracción	114
4.5.1 Periodo de Exposición de 48 hr.	114
4.5.2 Periodo de Exposición de 96 hr.	117
4.5.3 Periodo de Exposición de 196 hr.	119
4.5.4 Análisis de Resultados	121

4.6 Ensayo de Microdureza	123
4.6.1 Periodo de Exposición de 48 hr.	123
4.6.2 Periodo de Exposición de 96 hr.	126
4.6.3 Periodo de Exposición de 196 hr.	128
4.6.4 Análisis de Resultados	131
4.7 Ensayo de Impacto	132
4.7.1. Periodo de Exposición de 48 hr.	132
4.7.2. Periodo de Exposición de 96 hr.	134
4.7.3 Periodo de Exposición de 196 hr.	136
4.7.4 Análisis de Resultados	138
<b>CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	
5.1. Conclusiones	141
5.2. Recomendaciones	143
<b>Referencias bibliográficas</b>	145
<b>Anexos</b>	146

## Índice de figuras

<b>FIGURAS</b>	<b>Pág.</b>
2.1. Circuito básico de soldadura por arco	19
2.2. Soldadura por arco de fusión	20
2.3. Izq.: Disposición de los útiles y las piezas para soldar verticalmente por electroescoria. Dcha.: Vista en sección de las piezas y la soldadura durante una soldadura por electroescoria.	21
2.4. Operación de soldadura por arco de tungsteno y gas	22
2.5. Elementos de un circuito de soldadura típico para soldaduras por arco eléctrico protegido	30
2.6. Soldaduras por arco de metal protegido	36
2.7. Corrosión de acero con NaCl	46
2.8. Esquema de partes de una cámara de niebla salina	49
3.1. Máquina para soldar utilizada	60
3.2. Probeta Estándar para Ensayo de tracción	63
3.3. Probeta Estándar para Ensayo de tracción de probetas soldadas AWS	64
3.4. Dimensiones para probetas de Ensayos de tracción (mm)	64
3.5 Muestra Tippos Sheet para los ensayos de Tracción	64
3.6. Dimensiones para probetas de Ensayos de dureza y metalografía	65

3.7. Probeta Estándar para Ensayo de Impacto, Tipo A (dimensiones en mm)	66
3.8. Cámara de Niebla Salina Estándar	67
3.9. Máquina de Ensayos Mecánicos Universal utilizada	69
3.10. Zonas originadas luego del proceso de soldadura	74
3.11. Microdurometro	75
4.1. Probetas sometidas al ensayo de macroscopía	79
4.2. Probetas sometidas al ensayo de macroscopía (a) Muestra N°1 (b) Muestra N°2	79
4.3. Microscopia del metal base (a) Aumento de 100X, (b) Aumento de 200X	80
4.4. Microscopia del metal base (a) Aumento de 400X, (b) Aumento de 1000X	80
4.5. Microestructura ferrita y perlita (oscura) equiaxial (poligonal) en un Acero de bajo carbono a 500X	81
4.6. Microscopia de la interfase Metal Base-Zona Afectada Térmicamente (a) Aumento de 100X, (b) Aumento de 200X.	81
4.7. Microscopia de la interfase Zona Afectada Térmicamente-Cordón de Soldadura (a) Aumento de 100X, (b) Aumento de	8
4.8. Microscopia del Cordón de Soldadura (a) Aumento de 100X, (b) Aumento de 200X	82
4.9 . Microscopia del Cordón de Soldadura (a) Aumento de 400X, (b) Aumento de 1000X	82
4.10 Probeta de Tracción ensayadas mediante la caracterización del metal soldado	84
4.11 Tipo de fractura par las probetas de tracción ensayadas durante la caracterización del material soldado	84
4.12 Comparación de las gráficas de los ensayos de tracción de las probetas soldadas	85
4.13.Valores de dureza de las tres (3) probetas soldadas ensayadas.	88
4.14. Valores promedio de dureza de las zonas ensayadas	89

4.15 Vista transversal de las probetas para el ensayo Charpy	90
4.16 Probetas ensayadas del ensayo de Charpy para la caracterización del metal soldado	90
4.17. Fractura de las probetas ensayadas del ensayo del Charpy, para la caracterización del material soldado	91
4.18. Disposición de las probetas en la Cámara de Corrosión, de la Sala de Corrosión de la Universidad de Carabobo	92
4.19. Macroscopía (a) Metal Base, (b) Metal base-ZAT-Cordón de Soldadura (48hr de exposición)	94
4.20. Macroscopía (a) Cordón de Soldadura y Defecto, (b) Metal base-ZAT- Cordón de Soldadura (48hr de exposición)	94
4.21. Microscopia del Metal Base de la muestra b51 (a) Aumento de 100X, (b) Aumento de 200X	95
4.22. Microscopia del Metal Base de la muestra b51 (a) Aumento de 400X, b) Aumento de 1000X	96
4.23. Microscopia de la interfase Metal Base-Zona Afectada Térmicamente de la muestra b51 (a) Aumento de 100X, (b) Aumento de 200X	96
4.24. Microscopia de la interfase Metal Base-Zona Afectada Térmicamente de la muestra b51 (a) Aumento de 400X, (b) Aumento de 1000X	97
4.25. Microscopia de la Zona Afectada Térmicamente de la muestra b51 (a) Aumento de 100X, (b) Aumento de 200X	97
4.26. Microscopia de la Zona Afectada Térmicamente de la muestra b51 (a) Aumento de 400X, (b) Aumento de 1000X	98
4.27. Microscopia de la interfase Zona Afectada Térmicamente-Cordón de Soldadura de la muestra b51 (a) Aumento de 100X, (b) Aumento de 200X	98
4.28. Microscopia de la interfase Zona Afectada Térmicamente-Cordón de Soldadura de la muestra b51 (a) Aumento de	99

400X, (b) Aumento de 1000X	
4.29. Microscopia del Cordón de Soldadura de la muestra b51 (a) Aumento de 100X, (b) Aumento de 200X	99
4.30. Microscopia del Cordón de Soldadura de la muestra b51 (a) Aumento de 400X, (b) Aumento de 1000X	100
4.31. Macroscopia (a) Metal Base, (b) Metal base-ZAT-Cordón de Soldadura (96hr de exposición)	101
4.32. Macroscopia (a) Cordón de Soldadura y Defecto, (b) Metal base- ZAT- Cordón de Soldadura (96hr de exposición)	101
4.33. Microscopia del Metal Base de la muestra b42 (a) Aumento de 100X, (b) Aumento de 200X	102
4.34. Microscopia del Metal Base de la muestra b42 (a) Aumento de 400X, (b) Aumento de 1000X	103
4.35. Microscopia de la interfase Metal Base-Zona Afectada Térmicamente de la muestra b42 (a) Aumento de 100X, (b) Aumento de 200X	103
4.36. Microscopia de la nterfase Metal Base-Zona Afectada Térmicamente de la muestra b42 (a) Aumento de 400X, (b) Aumento de 1000X	104
4.37. Microscopia de la Zona Afectada Térmicamente de la muestra b42 (a) Aumento de 100X, (b) Aumento de 200X	104
4.38. Microscopia de la Zona Afectada Térmicamente de la muestra b42 (a) Aumento de 400X, (b) Aumento de 1000X	105
4.39. Microscopia de la interfase Zona Afectada Térmicamente- Cordón de Soldadura de la muestra b42 (a) Aumento de 100X, (b) Aumento de 200X	105
4.40. Microscopia de la interfase Zona Afectada Térmicamente- Cordón de Soldadura de la muestra b42 (a) Aumento de 400X, (b) Aumento de 1000X	106
4.41. Microscopia del Cordón de Soldadura de la muestra b42 (a) Aumento de 100X, (b) Aumento de 200X	106

4.42. Microscopia del Cordón de Soldadura la muestra b42 (a) Aumento de 400X, (b) Aumento de 1000X	107
4.43. Macroscopía (a) Metal Base, (b) Metal base-ZAT-Cordón de Soldadura (196 hr. de exposición)	108
4.44. Macroscopía (a) Cordón de Soldadura y Defecto, (b) Metal base-ZAT- Cordón de Soldadura	109
4.45. Microscopia del Metal Base de la muestra b43 (a) Aumento de 100X, (b) Aumento de 200X	109
4.46. Microscopia del Metal Base de la muestra b43 (a) Aumento de 400X, (b) Aumento de 1000X	110
4.47. Microscopia de la interfase Metal Base-Zona Afectada Térmicamente de la muestra b43 (a) Aumento de 100X, (b) Aumento de 200X	110
4.48. Microscopia de la interfase Metal Base-Zona Afectada Térmicamente de la muestra b43 (a) Aumento de 400X, (b) Aumento de 1000X	110
4.49. Microscopia de la Zona Afectada Térmicamente de la muestra b43	111
4.50. Microscopia de la interfase Zona Afectada Térmicamente-Cordón de Soldadura de la muestra b43 (a) Aumento de 100X, (b) Aumento de 200X	111
4.51. Microscopia de la interfase Zona Afectada Térmicamente-Cordón de Soldadura de la muestra b43 (a) Aumento de 400X, (b) Aumento de 1000X	112
4.52. Microscopia del Cordón de Soldadura de la muestra b43 (a) Aumento de 100X, (b) Aumento de 200X	112
4.53. Probetas de tracción ensayadas para un periodo de exposición de 48hr.	115
4.54. Fractura de las probetas de tracción ensayadas en el periodo de exposición de 48 hr.	115

4.55. Ensayo de tracción de las probetas sometidas a la cámara salina por un periodo de 48 hr.	116
4.56. Probetas de tracción ensayadas para un periodo de exposición de 96 hr.	117
4.57. Fractura de las probetas de tracción ensayadas en el periodo de exposición de 96 hr.	117
4.58. Ensayo de tracción de las probetas sometidas a la cámara salina por un periodo de 96 hr.	118
4.59. Probetas de tracción ensayadas para un periodo de exposición de 196 hr.	119
4.60. Fractura de las probetas de tracción ensayadas en el periodo de exposición de 196 hr.	120
4.61. Ensayo de tracción de las probetas sometidas a la cámara salina por un periodo de 196 hr.	120
4.62. Propiedades Mecánicas Vs. Tiempo de Exposición	121
4.63. Porcentaje de reducción de área y porcentaje de reducción vs tiempo de exposición.	122
4.64. Valores de durezas de las muestras sometidas por un periodo de 48 hr.	125
4.65. Valores promedio de dureza de las zonas ensayadas en un periodo de 48hr	126
4.66. Valores de durezas de las muestras sometidas por un periodo de 96 hr.	127
4.67. Valores promedio de dureza de las zonas ensayadas por un periodo 96hr.	128
4.68. Valores de durezas de las muestras sometidas por un periodo 196 hr.	130

4.69. Valores promedio de dureza de las zonas ensayadas por un periodo de 196hr.	131
4.70 Fractura de las probetas para el ensayo de Impacto para un periodo de exposición de 48 hr.	133
4.71. Probetas ensayadas en el ensayo de Impacto para un periodo de exposición de 48 hr	133
4.72. Gráfica de dispersión de los resultados del ensayo de impacto para un periodo de exposición de 48 hr.	134
4.73 Fractura de las probetas para el ensayo de Impacto para un periodo de exposición de 96 hr.	134
4.74. Probetas ensayadas en el ensayo de Impacto para un periodo de exposición de 96 hr	135
4.75. Gráfica de dispersión de los resultados del ensayo de impacto para un periodo de exposición de 96 hr.	135
4.76 Fractura de las probetas para el ensayo de Impacto para un periodo de exposición de 196 hr.	136
4.77. Probetas ensayadas en el ensayo de Impacto para un periodo de exposición de 196 hr	137
4.78. Gráfica de dispersión de los resultados del ensayo de impacto para un periodo de exposición de 196 hr	137
4.79. Resultados del ensayo de impacto para los diferentes tiempos de exposición	138

# Índice de tablas

<b>TABLAS</b>	<b>Pag.</b>
2.1. Composición química del acero ASTM A 283	15
2.2. Propiedades Mecánicas del acero ASTM A 283	15
2.3. Carta Maestra de los procesos de Soldadura	18
2.4. Electrodo de Tungsteno y copas de gas recomendado para diversas corrientes de soldadura	25
2.5. Código de color y elementos de aleación de diversas aleaciones para electrodo de tungsteno	26
2.6. Especificaciones de la AWS para electrodos cubiertos	34
3.1 Técnicas empleadas para el proceso	55
3.2. Especificaciones del proceso de soldadura	55
3.3. Parámetros de Gas a utilizar	56
3.4. Dimensiones Estándar para la probeta tipo Sheet	57
3.5. Características de la Cámara de Niebla Salina Estándar	58
4.1 Resultados obtenidos de la caracterización del metal base	77
4.2 Tamaño de grano para las muestras soldadas	75
4.3 Propiedades mecánica de las probetas soldadas	85
4.4 Resultado de las pruebas de dureza de la muestra soldada N°1	86
4.5 Resultado de las pruebas de dureza de la muestra soldada N°2	87

4.6 Resultado de las pruebas de dureza de la muestra soldada N°3	87
4.7 Resultado de las pruebas de dureza de las muestras soldadas	88
4.8 Resultados obtenidos para el ensayo de impacto de las muestras soldadas.	91
4.10. Resultados de Ensayo de corrosión en los tres (3) periodos de exposición	92
4.11. Pérdida de peso en las Probeta de tracción	93
4.12. Pérdida de peso en las Probeta de metalografía/dureza e Impacto	93
4.13 Tamaño de grano de las muestras expuestas a la corrosión por un periodo de 48 hr	100
4.14 Tamaño de grano de las muestras expuestas a la corrosión por un periodo de 96 hr	107
4.15 Tamaño de grano de las muestras expuestas a la corrosión por un periodo de 196 hr	113
4.16. Resultados del ensayo de tracción para un periodo de exposición de 48 hr.	116
4.17. Resultados del ensayo de tracción para un periodo de exposición de 96 hr.	118
4.18. Resultados del ensayo de tracción para un periodo de exposición de 196hr.	120
4.19 Propiedades Mecánicas en los diferentes tiempos de exposición.	122
4.20 Resultado de las pruebas de dureza de la muestra N°1	124
4.21 Resultado de las pruebas de dureza de la muestra soldada N°2	124
4.22 Resultado de las pruebas de dureza de la muestra soldada N°3	124
4.23 Resultado de las pruebas de dureza de las muestras soldadas	125
4.24 Resultado de las pruebas de dureza de la muestra soldada N°1	126
4.25 Resultado de las pruebas de dureza de la muestra soldada N°2	126

4.26 Resultado de las pruebas de dureza de la muestra soldada N°3	127
4.27 Resultado de las pruebas de dureza de las muestras soldadas	127
4.28 Resultado de las pruebas de dureza de la muestra soldada N°1	128
4.29 Resultado de las pruebas de dureza de la muestra soldada N°2	129
4.30 Resultado de las pruebas de dureza de la muestra soldada N°3	129
4.31 Resultado de las pruebas de dureza de las muestras soldadas	130
4.32 Valores de dureza de los diferentes tiempos de exposición.	131
4.33 Resultados para el ensayo de impacto para un periodo de 48 hr.	133
4.34 Resultados para el ensayo de impacto para un periodo de 96 hr.	135
4.35 Resultados para el ensayo de impacto para un periodo de 196 hr.	137
4.36 Resultados para el ensayo de impacto de los diferentes tiempos de exposición	138

# Introducción

---

---

El acero al carbono, es el material más utilizado en la ingeniería. A pesar de que su resistencia a la corrosión es relativamente limitada, el acero al carbono se utiliza en grandes aplicaciones marinas, energía nuclear y centrales eléctricas de combustibles fósiles, transporte, procesos químicos, la producción y refinación del petróleo, oleoductos, minería y la construcción. Por lo anterior su soldadura juega un papel importante.

El proceso de corrosión se define como el deterioro de un material a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno. De manera más general, puede entenderse como la tendencia general que tienen los materiales a buscar su forma más estable o de menor energía interna. Aunque el aire atmosférico es el medio más común, las soluciones acuosas, incluyendo las aguas naturales, la humedad atmosférica y la lluvia, son los ambientes frecuentemente asociados con los problemas de corrosión.

Actualmente el problema de la corrosión es uno de los aspectos más frecuentes en el mantenimiento de las instalaciones industriales. Este fenómeno llega a poner en riesgo a los sistemas de producción, como en el caso de las industrias químicas y petroquímicas.

Con este estudio se busca ampliar el estudio acerca del fenómeno de la corrosión de las juntas soldadas del acero ASTM A-283 GR B por los procesos de soldadura de Arco de Tungsteno y gas inerte (Gas Tungsten Arc Welding, GTAW) y Proceso de soldadura de Arco Manual (Shielded Metal Arc Welding, SMAW) expuestas a la corrosión por un ambiente marino. Para este ensayo

se empleo la cámara salina con una solución de cloruro de sodio al cinco (5) por ciento, durante tres (3) periodos de exposición. Para evaluar la corrosión se determinaron los cambios de las propiedades mecánicas entre las muestras patrón y las muestras expuestas al medio corrosivo.

El presente trabajo está constituido por 5 capítulos. 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 estableció la dirección que tomara el mismo. Además se muestran los alcances, limitaciones y justificaciones que sustentan el estudio.

En segundo capítulo se abarcan todas las teorías necesarias para proveer de conocimientos el tema con los que se podrán alcanzar los objetivos planteados y los mejores resultados. Aquí se explicaran los aceros al carbono estructurales, los procesos de soldadura de Arco de tungsteno y gas inerte (GTAW) y Arco metálico con electrodos revestidos (SMAW), así como también el proceso de corrosión por un ambiente marino.

El tercer capítulo presentará la metodología empleada para desarrollar la investigación. El objetivo de este capítulo consiste en explicar los aspectos metodológicos empleados para la consecución de los objetivos planteados en la investigación. Se muestran aspectos como el tipo de investigación, las técnicas y procedimientos que fueron utilizados para llevar el presente trabajo.

En el capítulo cuatro 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.

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

# CAPÍTULO 1

## *El problema*

---

---

### **1.1 Situación problemática**

El acero es uno de los materiales más utilizados en la industria para la construcción de estructuras, maquinarias, herramientas, entre otros, esto es debido a la versatilidad de sus propiedades mecánicas ya que combinan la resistencia mecánica, su maleabilidad, disponibilidad y su bajo costo, haciéndolo apropiado para la construcción de muchos dispositivos. Uno de los aceros más empleados a nivel industrial, son los aceros estructurales; debido a su alta resistencia y baja aleación, se utilizan para tanques de almacenaje, tanques de baja presión, tanques para controlar las temperaturas, reactores, perfiles, entre otros.

Entre los equipos que se realizan con estos aceros, también tenemos las torres de absorción, dispositivo simple que consiste en un envoltente que tiene en su interior un plato de soporte para el material de aislamiento y un dispositivo de distribución de líquido. Este equipo puede ser reparado mediante láminas de acero al carbono ASTM-283 y ASTM SECC VIII

conformando una sección toriesférica por veinticuatro (24) cuñas soldadas que al ser unidas permiten la geometría deseada. La soldadura como método de fijación de las placas (cuñas) permite que las piezas al unir se fundan en la junta, agregando o no un material de aporte, de manera de obtener un solo conjunto.

La American Welding Society (AWS) es la Sociedad Americana de Soldadura que se encarga de regular y estudiar todo lo referente a los procesos de unión por soldadura, en esta se encuentran catalogadas más de cincuenta (50) tipos de operaciones de uniones soldadas distintas, que utilizan diversos tipos o combinaciones de energía para proporcionar el calor requerido. Entre los métodos más utilizados se encuentra la soldadura GTAW (Soldadura de Arco de Tungsteno y gas inerte), donde se utiliza un electrodo no consumible de tungsteno sólido y se protege la soldadura fundida con un escudo de gas inerte; y SMAW (Proceso de soldadura de Arco Manual), donde un arco eléctrico es mantenido entre el electrodo cubierto y la pieza a trabajar, produciendo un escudo protector de la descomposición del compuesto que recubre el electrodo. La soldadura es un punto débil en la unión de los aceros, ya que debido al cambio de las propiedades mecánicas del material, produce ciertos efectos perjudiciales tales como: la aparición de grietas, incrustaciones, introducción de esfuerzos residuales y distorsiones que pueden causar fallas y corrosión del materia., entre otras.

La corrosión es la disolución o deterioro de un metal en un medio determinado, que también es conocido como metalurgia extractiva inversa. Se entiende como el deterioro que sufren los metales por el ataque químico con el medio en el que trabajan, donde interviene la temperatura, el material, el medio, el esfuerzo mecánico al que es sometido y la concentración de los reactivos y productos. (Smith, 2006)

Uno de los aspectos más frecuentes en el mantenimiento de las instalaciones industriales es el problema de la corrosión, efecto que ataca a

todos los metales y debilita su estructura, este fenómeno llega a poner en riesgo a los sistemas de producción, como en el caso de las industrias químicas y petroquímicas.

Este problema es la causa de una gran variedad de fallas y daños en los equipos expuestos a este tipo de ambientes, ya que producen grietas (sobre todo en los puntos sensibles, como los cordones de soldadura) como: fugas en los tanques o ductos, pérdida de resistencia mecánica en partes de la maquinaria o equipos y contaminación debido a las sustancias que se producen en la corrosión, que disminuyen la vida útil de los equipos y maquinarias.

La corrosión es un proceso que no se puede evitar, sin embargo sí se puede controlar y minimizar su impacto. El presente trabajo de investigación tiene como propósito realizar un estudio de la unión por soldadura a emplear y el material a soldar, siendo éste el material ASTM A-283 por ser un acero estructural frecuentemente utilizado en infraestructuras industriales debido a su alta soldabilidad, para así establecer el comportamiento de las propiedades mecánicas, bajo esas condiciones ambientales.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

*Evaluar las juntas soldadas del acero ASTM A-283 GR B por el proceso de soldadura GTAW y SMAW expuestas a la corrosión por un ambiente marino.*

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Caracterizar desde el punto de vista de la composición al acero ASTM A-283 GR B con relación al Certificado de origen.

- Definir las condiciones de operación de las juntas soldadas del acero ASTM A-283 GR B.
- Determinar los efectos de la corrosión en las juntas soldadas mediante las soldaduras GTAW y SMAW del acero ASTM A-283 GR B, a través del ensayo de niebla salina.
- Evaluar las uniones soldadas con el acero ASTM A-283 GR B con las soldaduras GTAW y SMAW por medio del ensayo de metalografía y ensayos mecánicos.

### **1.3 Justificación**

Los aceros al carbono son una alternativa tecnológica de gran interés por ser una opción económica, ofrecen buen comportamiento frente a la corrosión y poseen adecuadas propiedades mecánicas, principalmente en las aplicaciones relacionadas con las industrias del gas y del petróleo. En tal sentido, su soldadura juega un rol de importancia, en particular en relación a su resistencia a diversos modos de corrosión, su tenacidad y su soldabilidad.

La corrosión ocurre frecuentemente en uniones soldadas, ya que estas representan discontinuidades en las placas, donde puede aparecer la corrosión localizada. Por este motivo, es importante profundizar el estudio sobre la influencia de este fenómeno, porque ofrecería un proceso de mejora a equipos industrial del área petrolera, gasífera y petroquímica del país, que en su mayoría se encuentran ubicadas en zonas costeras, donde se presenta el caso de la corrosión atmosférica en un ambiente marino. En segundo lugar, se estaría haciendo un aporte en el marco de la investigación a la Universidad de Carabobo, brindando nuevas referencias para ser empleadas en el diseño de nuevos equipos.

Un ejemplo de la importancia de estudiar las juntas soldadas bajo ambientes salinos es el proyecto “Reemplazo del cabezal inferior de la Torre

de absorción final de la Planta de Acido Sulfúrico” de la empresa Pequiven, Morón, donde se sustituirá el fondo semiesférico de la Torre de Absorción, el cual en la actualidad se importa, por uno fabricado en la misma empresa mediante uniones soldadas con tecnología local. En este caso, se debe realizar una evaluación de las juntas soldadas, con el fin de obtener un posible patrón de comportamiento de las propiedades mecánicas, con relación al ambiente donde va a ser empleado.

## **1.4 Alcance**

La investigación se realizará con una (1) concentración de cloruro de sodio que simule la atmósfera marina, a esta se someterán cuatro (4) probetas para los ensayos de tracción, seis (6) probetas para los ensayos de impacto y cinco (5) probetas para los ensayos de dureza y metalografía, por tres (3) diferentes periodos de tiempo establecido para la realización de ensayos normalizados, según la norma ASTM B 117 – 07a. Esto da un total de cuarenta y cinco (45) probetas para realizar los análisis de la corrosión y se emplearán, además, quince (15) probetas adicionales para los ensayos de tracción, impacto, dureza y metalografía del material sin corrosión, para un total de sesenta (60) probetas a emplear.

Se realizarán ensayos normalizados de: tracción (según la norma ASTM E8), dureza (micro dureza Vickers, según la norma E92-82), Impacto “Charpy-V” (según la norma ASTM E23) y metalografía antes y después de la exposición a la cámara salina, con el fin de verificar la influencia de la corrosión sobre la soldadura.

- 8 *Evaluación de las juntas soldadas del acero ASTM A-283 GR B por el proceso de soldadura GTAW y SMAW expuestas a la corrosión por un ambiente marino*

## **1.5 Limitaciones**

El estudio se llevará a cabo en el transcurso de dos (2) semestres académicos.

# CAPÍTULO 2

## *Marco Teórico*

---

---

### **2.1 Antecedentes**

En el Diario de Tecnología de Procesamiento de Materiales, (Journal of Materials Processing Technology, Vol. 57, numero 3, de 1996) se encuentran diversas investigaciones basadas en la importancia de la corrosión en procesos de soldadura con diferentes materiales. Se ha estudiado la influencia de la soldadura en la corrosión en materiales disímiles, como el acero inoxidable AISI 304 y el cobre DHP en un ambiente marino. En el trabajo anterior se determina qué material tiene el mejor comportamiento dependiendo de las propiedades específicas en las uniones soldadas, evaluando tanto los diferentes procesos de soldadura utilizados como el electrodo utilizado, así como también considerando su comportamiento mecánico y resistencia a la corrosión al ambiente marino. Los materiales seleccionados, se soldaron en su base para obtener probetas de 1,5 mm de espesor del acero AISI 304 y cobre desoxidado con fosforo, donde se utilizó el proceso de soldadura TIG y oxiacetilénico con cinco tipos diferentes de materiales comerciales para soldar, por ejemplo E CuNi, E309L-16 y otros que contienen Ag. Las uniones disímiles se estudiaron en función de la dureza,

fuerza y distribución de las tensiones. Todas las probetas se analizaron utilizando exámenes electroquímicos con la finalidad de determinar los parámetros de la corrosión en un ambiente marino (3% NaCl). Los resultados muestran diversas correlaciones que validan diversas técnicas utilizadas, y correlaciones de desempeño y comportamiento que se obtuvieron a través de la dureza y la fuerza mecánica, la densidad, potencial, la resistencia a polarización y composición química de las uniones soldadas. (Cabezas y Zumelzu, 1996)

Por otro lado, se han realizado evaluaciones de la soldadura SAW sobre la resistencia a la corrosión en aceros DUPLEX SAF 2205. Se ha estudiado la influencia de las variables operacionales; intensidad, voltaje y velocidad de avance, sobre la resistencia a la corrosión de soldaduras por arco sumergido (SAW) de aceros inoxidables dúplex SAF 2205. Bajo la combinación de estos parámetros se establecieron ocho (8) condiciones de energía de entrada (HI) y a partir de ellas, las soldaduras se clasificaron en tres (3) grupos en función de la variable manejada. Una vez elaborados los cupones se realizó análisis metalográfico mediante microscopía óptica y electrónica para caracterizar la microestructura presente en cada cordón. Se realizaron dos tipos de ensayos para evaluar la resistencia a la corrosión en un medio salino, el primero fue inmersión durante cuarenta y cuatro (44) semanas, y el segundo fue mediante la realización de curvas de polarización cíclica galvanostática escalonada (PCGE), ambos en una solución de NaCl 3,5% en peso. Del análisis de los resultados se obtuvo que la pérdida de la resistencia a la corrosión localizada de este tipo de aceros, luego de soldarlos, se debe principalmente a dos causas: la primera está asociada a la microestructura en la zona de fusión, y la segunda, a la presencia de algunos defectos de la soldadura como grietas y poros. (Dorta et al, 2009)

En el estudio de la corrosión atmosférica del acero bajo en carbono se han realizado varios estudios. En la revista de metalurgia, se presenta un

estudio de la corrosión atmosférica en un ambiente polar, bajo el efecto del régimen de vientos. En el trabajo se estudia la corrosión atmosférica del acero al carbono (UNE-EN 10130) en un ambiente marino polar (Base Científica Antártica Artigas (BCAA), Uruguay), en función de la salinidad atmosférica del lugar y del tiempo de exposición. Se establece una relación lineal entre corrosión en el primer año de exposición atmosférica y velocidad de deposición de salinidad en el intervalo de salinidades medias encontrado ( $125-225 \text{ mg} \cdot \frac{\text{Cl}^-}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}$ ), así como una relación bilogarítmica entre corrosión y tiempo de exposición (1-4 años). Se relaciona la salinidad atmosférica con la velocidad media mensual del viento y su dirección característica, a partir del concepto de recorrido del viento. Velocidades de depósito de iones cloruro inferiores a  $300 \text{ mg} \cdot \frac{\text{Cl}^-}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}$ , se deben a vientos lejanos oceánicos y vientos costeros con velocidades, fundamentalmente, en el intervalo 1-40 km/h. Se obtiene que la corrosión con el tiempo de exposición sigue una función de potencia y la capa de productos de corrosión promueve un cierto efecto protector, entre otros. (Rivero et al, 2007)

## 2.2 Bases teóricas

Los metales y las aleaciones empleados en la industria y en la construcción pueden dividirse en dos grupos principales: Materiales ferrosos y no ferrosos. Ferroso viene de la palabra Ferrum que los romanos empleaban para el hierro o hierro. Por lo tanto, los materiales ferrosos son aquellos que contienen hierro como su ingrediente principal; es decir, las numerosas calidades del hierro y el acero.

Uno de los materiales de fabricación y construcción más versátil, más adaptable y más ampliamente usado es el acero. A un precio relativamente bajo, el acero combina la resistencia y la posibilidad de ser trabajado, lo que se presta para fabricaciones mediante muchos métodos. Además, sus

propiedades pueden ser manejadas de acuerdo a las necesidades específicas mediante tratamientos con calor, trabajo mecánico, o mediante aleaciones.

### **2.2.1 Aceros**

El acero es una aleación de hierro y carbono, donde el carbono no supera el 2,1 por ciento en peso de la composición de la aleación, alcanzando normalmente porcentajes entre el 0,2 - 0,3 por ciento. Por su alta versatilidad y disponibilidad; sus dos elementos primordiales abundan en la naturaleza facilitando su producción en cantidades industriales; los aceros son las aleaciones más utilizadas en la construcción de maquinaria, herramientas, edificios y obras públicas, habiendo contribuido al alto nivel de desarrollo tecnológico de las sociedades industrializadas.

#### **2.2.1.1 Clasificación de los Aceros**

Los aceros pueden ser clasificados por una variedad de diferentes sistemas. Aquí se especifica la clasificación más común:

- **Aceros al carbono**: Más del noventa por ciento de todos los aceros son aceros al carbono. Estos aceros contienen diversas cantidades de carbono y menos del 1,65 por ciento de manganeso, el 0,60 por ciento de silicio y el 0,60 por ciento de cobre. Entre los productos fabricados con aceros al carbono figuran máquinas, carrocerías de automóvil, la mayor parte de las estructuras de construcción de acero, cascos de buques, entre otros.

Los aceros al carbono se clasifican en general en función de la proporción (por peso) del contenido de carbono. (Kalpakjian et al, 2008)

1. ***Aceros al bajo carbón***: también conocido como acero suave o dulce, que tiene menos de 0,30 por ciento de carbono. Comúnmente es

utilizado para productos industriales comunes, como pernos, tuercas, láminas, placas y tubos y para componentes de máquinas que no requieren de alta resistencia.

2. *El acero al medio carbono*, tiene de 0,30 - 0,60 por ciento de carbono. Es generalmente utilizado en aplicaciones que requieren una resistencia más elevada a la disponible en los aceros de bajo carbono, como en piezas de equipo de maquinaria automotriz y equipo agrícola (engranes, ejes, bielas, cigüeñales), en equipo de ferrocarriles, y en piezas para maquinaria de trabajado de metales.
  3. *El acero al alto carbono* tiene más de 0,60% de carbono. Se utiliza por lo general para partes que requieren resistencia mecánica, dureza y resistencia al desgaste, como las herramientas de corte, cable, alambre para música, resortes y cuchillería. Después de haber sido manufacturado a su forma, las piezas por lo general son tratadas térmicamente y templadas. Mientras más elevado sea el contenido de carbono del acero, más alta será su dureza, su resistencia mecánica y su resistencia al desgaste después del tratamiento térmico.
  4. *También están disponibles aceros al carbono que contiene azufre y fosforo*; se conoce como aceros al carbono sulfatados y aceros al carbono refosfatados y sulfatados. (Series 11xx) y aceros al carbono y sulfurados (series 12xx).
- *Aceros Aleados*: Estos aceros contienen una proporción determinada de vanadio, molibdeno y otros elementos, además de cantidades mayores de manganeso, silicio y cobre que los aceros al carbono normales. Estos aceros se emplean, por ejemplo, para fabricar engranajes y ejes de motores, patines o cuchillos de corte. (Falk et al, 1986)
  - *Aceros de baja aleación ultra resistentes*: En estos aceros la suma de los elementos de aleación asciende como máximo al cinco por ciento.

Los aceros de baja aleación son más baratos que los aceros aleados convencionales ya que contienen cantidades menores de los costosos elementos de aleación. Sin embargo, reciben un tratamiento especial que les da una resistencia mucho mayor que la del acero al carbono. En la actualidad se construyen muchos edificios con estructuras de aceros de baja aleación. Las vigas pueden ser más delgadas sin disminuir su resistencia, logrando un mayor espacio interior en los edificios. (Falk et al, 1986)

- *Aceros inoxidables*: contienen cromo, níquel y otros elementos de aleación, que los mantienen brillantes y resistentes a la herrumbre y oxidación a pesar de la acción de la humedad o de ácidos y gases corrosivos. Algunos aceros inoxidables son muy duros; otros son muy resistentes y mantienen esa resistencia durante largos periodos a temperaturas extremas. Debido a sus superficies brillantes, en arquitectura se emplean muchas veces con fines decorativos. El acero inoxidable se utiliza para las tuberías y tanques de refinerías de petróleo o plantas químicas, para los fuselajes de los aviones o para cápsulas espaciales. También se usa para fabricar instrumentos y equipos quirúrgicos, o para fijar o sustituir huesos rotos, ya que resiste a la acción de la corrosión de los fluidos corporales.
- *Aceros de Herramientas*: Estos aceros se utilizan para fabricar muchos tipos de herramientas y cabezales de corte y modelado de máquinas empleadas en diversas operaciones de fabricación. Contienen wolframio, molibdeno y otros elementos de aleación, que les proporcionan mayor resistencia, dureza y durabilidad.

### 2.2.1.2 Material de estudio (ASTM A 283 grado B)

#### Composición química del acero ASTM A 283

Según la norma ASTM A 283/A 283M-03, la composición química que corresponde al acero A 283 es la que se presenta en la tabla a 2.1:

Tabla 2.1. Composición química del acero ASTM A 283

<b>ASTM A 283 grado B</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Carbón	0,17
Manganeso	0,90
Fosforo	0,035
Sulfuro	0,04
<b>Silicio</b>	
Placas 1 ½ pulg. y menores	0,40
Placas de más de 1 ½ pulg.	0,15-0,40
Cobre (% min)	0,20

Fuente: Especificaciones estándar para Baja y Media Resistencia a la tracción de placas de acero al carbono (Designación: A 283/A 283M – 03)

#### Propiedades Mecánicas del acero ASTM A283

Tabla 2.2. Propiedades mecánicas del acero ASTM A 283

<b>Propiedades</b>	<b>ASTM A 283 grado B</b>
Limite Elástico (MPa) Ksi	(345–450) 50–65
Resistencia a la Tracción (MPa) Ksi	(185) 27
Elongación % (En 200 mm)	28
Elongación % (En 50 mm)	25

Fuente: Especificaciones estándar para Baja y Media Resistencia a la tracción de placas de acero al carbono (Designación: A 283/A 283M – 03)

### 2.2.1.3 Aplicaciones del material de estudio

Este acero se caracteriza por ser de baja resistencia para piezas estructurales y perfiles de uso moderado. Es ideal para propósitos estructurales.

Por otro lado presenta una alta soldabilidad; bajo las especificaciones de la norma; sin embargo las variaciones en las propiedades mecánicas a bajas temperaturas son considerables, por lo que estos aceros no son recomendables bajo estas circunstancias.

Así mismo es utilizado para la construcción de plataformas, pisos, escaleras, equipamiento de transporte y circulación, fabricación de tanques para la industria en general y elementos estructurales en general.

## 2.2.2 Proceso de Soldadura

### 2.2.2.1. Definición

Una soldadura es una unión localizada entre dos materiales que es producida por una adecuada combinación de temperatura y/o presión. En la mayoría de los casos involucra metales, y para obtener una fusión debe haber una combinación suficiente de proximidad y actividad entre las moléculas de las piezas a unir, para que ellas formen cristales metálicos comunes. En realidad, el rango de las combinaciones de proximidad y actividad es tan grande que la unión puede producirse sólo por temperatura, sin ninguna presión externa, o por presión solamente, sin la aplicación de calor. Entre estos dos extremos hay una amplia extensión de combinaciones posibles de temperatura y presión que pueden usarse para soldar.

El proceso de soldadura como tal recibe diferente nombre de acuerdo a las temperaturas que alcanzan los materiales involucrados en la soldadura, entre esos nombres tenemos: Welding (Soldadura) que es el procedimiento de juntar dos metales donde el material base es elevado a una alta temperatura

superando su punto de fusión, y en donde, aprovechando su estado líquido se mezclan para formar una unión de fusión de todas las partes envueltas incluyendo el material de aporte si existiera. Brazing (Soldadura) que es el procedimiento de juntar dos metales usando un material de aporte con una temperatura de trabajo por encima de los 427°C (800 F) pero siempre por debajo del punto de fusión del material base. Y Soldering (Soldadura) que es el procedimiento de juntar dos metales usando un material de aporte a una temperatura de trabajo por debajo de los 427°C (800 F) pero siempre por debajo del punto de fusión del metal base. (E Paul DeGarmo, 2007)

#### 2.2.2.2 Clasificación de los procesos 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), etc. 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. (E Paul DeGarmo, 2007)

La American Welding Society (AWS) a través de su carta patrón de procesos de soldadura, reseña los distintos procesos básicos que son usados para producir una soldadura. En su conjunto, estos procedimientos ofrecen toda una variedad de maneras de cumplir las condiciones establecidas antes y una amplia gama de métodos que posibilitan unir por soldadura, de modo efectivo y económico, casi todos los metales y combinaciones de metales.

Tabla 2.3. Carta Maestra de los procesos de Soldadura

Soldadura Fuerte	<p>Soldadura Fuerte por Infrarrojo (IRS)</p> <p>Soldadura Fuerte por Soplete (TS)</p> <p>Soldadura Fuerte al Horno (FS)</p> <p>Soldadura Fuerte por Inducción (IS)</p> <p>Soldadura Fuerte por Resistencia (RS)</p> <p>Soldadura Fuerte por Inmersión (KB)</p>
Soldadura a Gas	<p>Soldadura Oxiacetilénica (OAW)</p> <p>Soldadura Oxhídrica (OHW)</p> <p>Soldadura a Gas con presión (PGW)</p>
Soldadura por Resistencia	<p>Soldadura por Resistencia a Puntos (RSW)</p> <p>Soldadura por Resistencia a la Costura (RSEW)</p> <p>Soldadura por Resistencia a Proyección (RFW)</p> <p>Soldadura por Arco con presión (FW)</p> <p>Soldadura por Recalcado (UV)</p> <p>Soldadura por Percusión (PEW)</p>
Soldadura por Arco	<p>Soldadura por Arco de Espárragos (SW)</p> <p>Soldadura por Arco de Plasma (PAW)</p> <p>Soldadura por Arco Sumergido (SAW)</p> <p>Soldadura por Arco de Gas Tungsteno –TIG (<b>GTAW</b>)</p> <p>Soldadura metálica con Arco eléctrico y gas (GMAW)</p> <p>Soldadura por Arco con núcleo de flujo (FCAW)</p> <p>Soldadura por Arco metálico con electrodos revestidos (<b>SMAW</b>)</p> <p>Soldadura por Arco con Carbón (GAW)</p>
Soldadura al Estado Sólido	<p>Soldadura en frío (CW)</p> <p>Soldadura por fusión (FW)</p> <p>Soldadura por explosión (EXW)</p> <p>Soldadura por forja (FOW)</p> <p>Soldadura por fricción (FRW)</p> <p>Soldadura Ultrasónica (USW)</p>

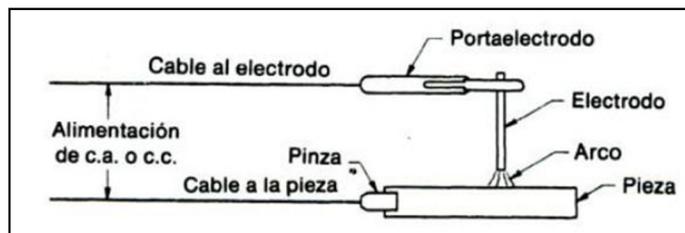
Continuación de la Tabla 2.3. Carta Maestra de los procesos de Soldadura

Otros Procesos	Soldadura por haz de electrones (LBW) Soldadura por electroescoria (EW) Soldadura por inducción (IW) Soldadura por rayo láser (LSW) Soldadura Aluminotermia (TW)
----------------	--

Fuente: Carta Maestra de Procesos de Soldadura AWS (Manual de Soldadura OERLIKON y EXSA)

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. 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. (E Paul DeGarmo, 2007)

La fuente de calor es un arco eléctrico mantenido entre la pieza y un electrodo o entre dos electrodos. Este método de soldadura se usó ya en 1881 en Europa. En la figura 2.1 se observa el circuito básico del mismo.

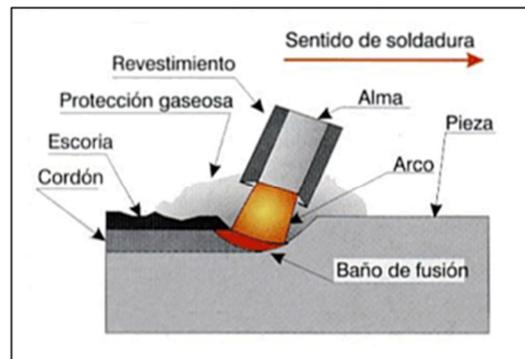


**Figura 2.1.** Circuito básico de soldadura por arco

Fuente: E. Paul DeGarmo, 2007

Casi desde el momento en que la electricidad se convirtió en una realidad comercial, se supo que el arco eléctrico que salta entre dos electrodos es un foco calórico concentrado cuya temperatura se acerca a los 3900 °C. Como en la soldadura con soplete, era necesario añadir material de aporte procedente de un alambre metálico. Posteriormente, se empleó como

electrodo un alambre metálico desnudo, el cual se fundía en el arco y proveía el metal de aporte necesario. Sin embargo, los resultados eran muy inconsistentes. Dada la inestabilidad del arco, para mantenerlo se requería una buena dosis de pericia, y de la exposición a la atmósfera del metal depositado, bajo temperaturas tan altas, resultaba la contaminación y la oxidación del mismo. Y lo que es más, poco o nada se sabía acerca de los efectos y condicionantes metalúrgicos. Por tanto, aunque se admitía el enorme potencial de esta técnica, especialmente a consecuencia de las experiencias de la I Guerra Mundial, poco uso se hizo de ella hasta después de esa época. Hacia 1920 aparecieron los electrodos de metal revestidos, que proporcionaron un arco estable, la figura 2.2 se presenta el esquema del proceso en la actualidad. (E Paul DeGarmo, 1979)



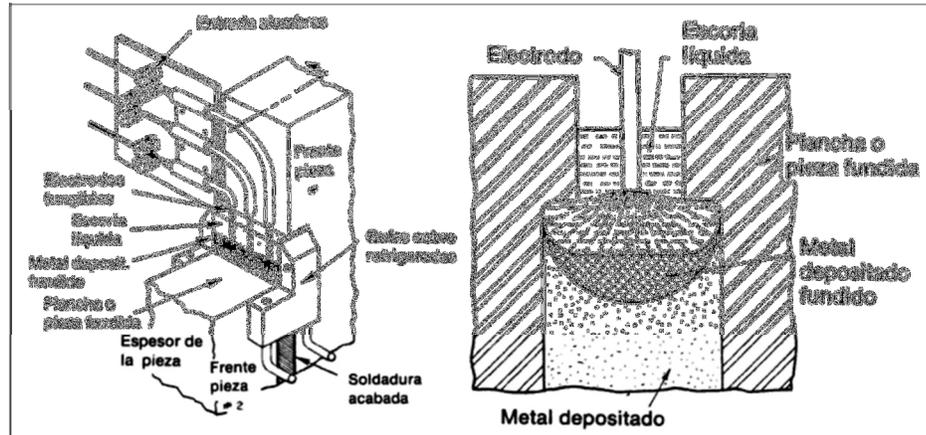
**Figura 2.2.** Soldadura por arco de fusión

Fuente: Cristóbal de Monroy, Tecnología Industrial

La **soldadura de estado sólido** se refiere a los procesos de unión en los cuales la fusión proviene de la aplicación de presión solamente o una combinación de calor y presión. La temperatura del proceso está por debajo del punto de fusión de los metales que se van a soldar. No se utiliza un material de aporte en este tipo de procesos de soldadura.

Existe un conjunto de procedimientos de soldadura muy útiles que emplean unos focos caloríficos distintos a llamas de gas, resistencias

eléctricas o arcos eléctricos. Algunos de ellos son muy antiguos, pero otros se cuentan entre los más recientes procedimientos de soldadura, como el mostrado en la figura 2.3



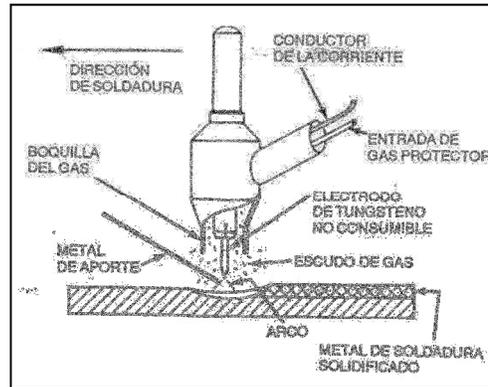
**Figura 2.3.** Izq.: Disposición de los útiles y las piezas para soldar verticalmente por electroescoria. Dcha.: Vista en sección de las piezas y la soldadura durante una soldadura por electroescoria. Fuente: E Paul DeGarmo, 2007

### 2.2.2.3. Procesos de soldadura por arco eléctrico

#### 2.2.2.3.1 Soldadura por Arco de Gas Tungsteno (GTAW)

##### Descripción del proceso

La soldadura por arco de tungsteno y gas (*gas tungsten arc welding*, GTAW) es un proceso de soldadura por arco que utiliza un arco entre un electrodo de tungsteno (no consumible) y el charco de soldadura. El proceso se emplea con un gas protector y sin aplicación de presión. La adición de metal de aporte es opcional. La figura 2.4 muestra el proceso de soldadura por arco de tungsteno y gas. (Manual de Soldadura, 2004)



**Figura 2.4.** Operación de soldadura por arco de tungsteno y gas

Fuente: Manual de Soldadura/ American Welding Society, 2004

El proceso utiliza un electrodo de tungsteno (o de una aleación de tungsteno) no consumible sostenido en un soplete. Se alimenta gas protector por el soplete para proteger el electrodo, el charco de soldadura y el metal de soldadura en proceso de solidificación de contaminación por parte de la atmósfera. El arco eléctrico se produce por el paso de corriente a través del gas protector ionizado, que conduce la electricidad. El arco se establece entre la punta del electrodo y el trabajo. El calor generado por el arco funde el metal base. Una vez establecido el arco y el charco de soldadura, el soplete se mueve a lo largo de la unión y el arco funde progresivamente las superficies de empalme. Si se usa alambre de aporte, se alimenta por el borde delantero del charco de soldadura para llenar la unión.

Todas las configuraciones de GTAW tienen en común cuatro componentes básicos:

1. Soplete.
2. Electrodo.
3. Fuente de potencia para soldadura.
4. Gas protector.

Variables del proceso:

Las principales variables en el proceso GTAW son el voltaje del arco

(longitud del arco), la corriente de soldadura, la velocidad de recorrido y el gas protector. La cantidad de energía producida por el arco es proporcional a la corriente y, al voltaje La cantidad transferida por unidad de longitud de soldadura es inversamente proporcional a la velocidad de recorrido. El arco de helio es más penetrante que al argón. Sin embargo, como todas estas variables tienen fuertes interacciones, es imposible tratarlas como variables independientes al establecer los procedimientos de soldadura para uniones específicas. (Manual de Soldadura, 2004)

1. Corriente del arco: La corriente del arco controla la penetración de la soldadura, su efecto es directamente proporcional, si no es que un poco exponencial. Además la corriente de arco afecta el voltaje: si se mantiene constante la longitud del arco, su voltaje aumentará en proporción con la corriente. Por esta razón, si se desea mantener una longitud de arco fija, es preciso ajustar también el voltaje cuando se ajusta la corriente. El proceso puede usarse con corriente tanto continua como alterna, y la elección depende en buena parte del metal que se va a soldar. La corriente continua con el electrodo negativo ofrece las ventajas de penetración profunda y velocidades de soldadura altas, sobre todo cuando se usa gas protector de helio. El helio es el gas preferido para la soldadura mecanizada. La corriente alterna tiene una acción de limpieza catódica (chisporroteo) que elimina óxidos refractarios de las superficies de unión de aluminio y magnesio, lo que permite obtener soldaduras de muy buena calidad. En este caso, es preciso usar argón como gas protector porque no puede lograrse chisporroteo con helio. El argón es el gas preferido para la soldadura manual, sea que se utilice con corriente alterna o continua. Existe una tercera opción en cuanto a la potencia: usar corriente continua con el electrodo positivo. Esta polaridad casi nunca se usa porque hace que se sobrecaliente el electrodo.

2. Voltaje del arco: El voltaje medido entre el electrodo de tungsteno y el trabajo se conoce comúnmente como voltaje del arco. Éste voltaje es una variable muy dependiente, que acusa efectos por lo siguiente: (1) Corriente del arco, (2) Forma de la punta del electrodo de tungsteno, (3) Distancia entre el electrodo de tungsteno y el trabajo y (4) Tipo de gas protector.
3. Velocidad de recorrido: La velocidad de recorrido afecta tanto la anchura como la penetración de una soldadura por arco de tungsteno y gas, aunque el efecto sobre la anchura es más pronunciado que aquel sobre la penetración. La velocidad de recorrido es importante por su efecto sobre el costo. En algunas aplicaciones, la velocidad de recorrido se define como un objetivo, y las demás variables se seleccionan de modo que se logre la configuración de soldadura deseada a esa velocidad.
4. Alimentación del alambre: En la soldadura manual, la forma como el metal de aporte se añade al charco influye sobre el número de pasadas necesarias y el aspecto de la soldadura terminada. En la soldadura mecanizada y automatizada, la velocidad de alimentación del alambre determina la cantidad de metal de aporte depositada por unidad de longitud de la soldadura. (Manual de Soldadura, 2004)

### Equipo Básico

1. Sopletes para soldar:

Los sopletes de GTAW sostienen el electrodo de tungsteno que transporta la corriente de soldadura al arco y conducen el gas protector a la zona del arco. Las especificaciones de los sopletes se refieren a la corriente de soldadura máxima que pueden transportar sin sobrecalentar. Casi todos los

sopletes para aplicaciones manuales tienen un Angulo de cabeza (el ángulo entre el electrodo y el mango) de 120°. (Manual de Soldadura, 2004)

## 2. Electrodos:

En GTAW la palabra *tungsteno* se refiere al elemento tungsteno puro y a las diferentes aleaciones de tungsteno empleadas como electrodos. Los electrodos de tungsteno son no consumibles si el proceso se emplea como es debido, ya que no se derriten ni se transfieren a la soldadura. El punto de fusión del tungsteno es 3410°C (6170°F), y cuando se acerca a esta temperatura se vuelve termoiónico; es decir, es una fuente abundante de electrones. El electrodo alcanza esta temperatura gracias al calentamiento por resistencia y, de no ser por el considerable efecto de enfriamiento de los electrones que se desprenden de su punta, dicho calentamiento haría que se fundiera la punta. De hecho, la punta del electrodo tiene una temperatura mucho menor que la parte que está entre la punta y el mandril con enfriamiento externo. (Manual de Soldadura, 2004)

### Clasificación de los electrodos

Los electrodos de tungsteno se clasifican con base en su composición química, como se especifica en la tabla 2.4. Los requisitos para los electrodos de tungsteno se dan en la edición más reciente de ANSI/AWS A5.12, *Especificación para electrodos de tungsteno y de aleación de tungsteno para soldadura y corte por arco*. (Manual de Soldadura, 2004)

Tabla 2.4. Electrodos de Tungsteno y copas de gas recomendado a para diversas corrientes de soldadura

Diámetro del electrodo		Diam, int. Copa de gas	Corriente Continua, A		Corriente Alterna, A	
			Polaridad directa <sup>b</sup>	Polaridad inversa <sup>b</sup>	Onda no balanceada <sup>c</sup>	Onda balanceada <sup>c</sup>
Pulg.	mm	Pulg.	CCEN	CCEP		
0,010	0,25	1/4	hasta 15		hasta 15	hasta 15
0,020	0,50	1/4	5-20		5-15	10-20
0,040	1,00	3/8	15-80		10-60	20-30
1/16	1,6	3/8	70-150	10-20	50-100	30-80

Continuación de la Tabla 2.4. Electrodo de Tungsteno y copas de gas recomendado a para diversas corrientes de soldadura

3/32	2,4	1/2	150-250	15-30	100-160	60-130
1/8	3,2	1/2	250-400	25-40	150-210	100-180
5/32	4,0	1/2	400-500	40-55	200-275	160-240
3/16	4,8	5/8	500-750	55-80	250-350	190-300
114	6,4	3/4	750-1100	80-125	325-450	325-450

- a. Todos los valores se basan en el empleo de argón como gas protector
- b. Usar electrodos EWTh-2
- c. Usar electrodos EWP

Fuente: Manual de Soldadura/ American Welding Society, 2004

Tabla 2.5. Código de color y elementos de aleación de diversas aleaciones para electrodo de tungsteno

Clasificación AWS	Color <sup>a</sup>	Elemento aleación	Óxido de aleación	Porcentaje en peso nominal de óxido de aleación
EWP	Verde	--	--	--
EWCe-2	Anaranjado	Cerio	CeO <sub>2</sub>	2
EWLa-1	Negro	Lantano	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1
EWTh-1	Amarillo	Torio	ThO <sub>2</sub>	1
EWTh-2	Rojo	Torio	ThO <sub>2</sub>	2
EWZr-1	Marrón	Zirconio	ZrO <sub>2</sub>	.25
EWG	Gris	No se esp. <sup>b</sup>	--	--

- a. El color puede aplicarse en forma de bandas, puntos, etc. En cualquier punto de la superficie del electrodo
- b. EL fabricante debe identificar el tipo y el contenido nominal de la adición de óxido de tierra rara.

Fuente: Manual de Soldadura/ American Welding Society, 2004

### 3. Gases protectores:

El argón y el helio, o las mezclas de estos dos, son los tipos más comunes de gases inertes empleados como escudo. En aplicaciones especiales

se usan mezclas de argón e hidrógeno. Dependiendo del volumen utilizado, estos gases pueden suministrarse en cilindros o como líquidos en tanques aislados. El líquido se vaporiza y envía mediante tuberías a distintos puntos de la planta, con lo que se elimina el manejo de cilindros.

- Argón:

El argón (As) es un gas monoatómico inerte con peso molecular de cuarenta. Se obtiene de la atmósfera por separación del aire licuado.

El argón de grado soldadura se refina hasta una pureza mínima del 99,95%. Esto es aceptable para soldar con GTAW la mayor parte de los metales excepto los reactivos y refractarios, para los cuales se requiere una pureza mínima de 99,997 %. En muchos casos, estos metales se procesan en cámaras de las que se ha purgado todo el aire antes de iniciarse la operación de soldadura. (Manual de Soldadura, 2004)

El argón se utiliza más ampliamente que el helio porque tiene las siguientes ventajas:

- (1) Acción de arco más uniforme y silencioso.
- (2) Menor penetración.
- (3) Acción de limpieza al soldar materiales como el aluminio y el magnesio.
- (4) Menor costo y mayor disponibilidad.
- (5) Buena protección con tasas de flujo más bajas.
- (6) Mayor resistencia a ráfagas transversales.
- (7) Más fácil iniciación del arco.

La menor penetración de un arco escudado con argón resulta especialmente útil al soldar a mano materiales delgados, ya que se reduce la tendencia a una perforación excesiva. Esta misma característica representa

una ventaja en la soldadura vertical o cenital porque se reduce la tendencia del metal base a pandearse o escurrir.

- Helio.

El helio (He) es un gas monoatómico inerte muy ligero, con peso atómico de cuatro. Se obtiene por separación a partir del gas natural. El helio de grado soldadura se refina hasta una pureza de por lo menos el 99,99%.

Con valores fijos de corriente de soldadura y longitud del arco, el helio transfiere más calor al trabajo que el argón. El mayor poder de calefacción del arco de helio puede ser ventajoso al soldar metales con elevada conductividad térmica y en aplicaciones mecanizadas de alta velocidad. Además, el helio se usa con mayor frecuencia que el argón para soldar placas gruesas. Las mezclas de helio y argón son útiles cuando se desea un término medio entre las características de ambos gases. (Manual de Soldadura, 2004)

- Características del argón y el helio.

El factor principal que influye en la efectividad de la protección es la densidad del gas. El argón es aproximadamente una y un tercio veces más denso que el aire y diez veces más denso que el helio. El argón, después de salir por la boquilla del soplete, forma un manto sobre el área de soldadura. El helio, como es más ligero, tiende a elevarse alrededor de la boquilla. (Manual de Soldadura, 2004)

#### 2.2.2.3.2 Soldadura por Arco metálico con electrodos revestidos (SMAW)

##### Descripción del proceso

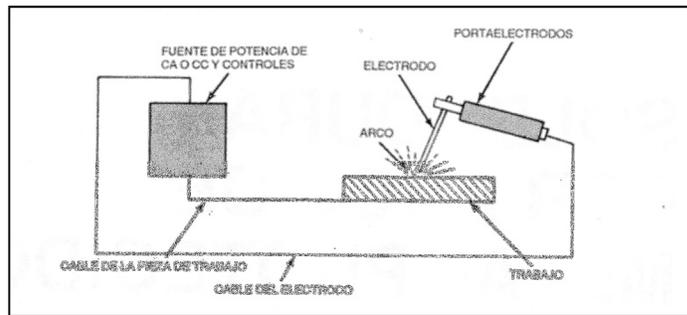
La soldadura por arco de metal protegido (Shielded metal arc welding, SMAW) es un proceso de soldadura por arco en el que se produce coalescencia de metales por medio del calor de un arco eléctrico que se mantiene entre

la punta de un electrodo cubierto y la superficie del metal base en la unión que se está soldando.

El núcleo del electrodo cubierto consiste en una varilla de metal sólida de material estirado o colado, o bien una varilla fabricada encerrando metal en polvo en una funda metálica. La varilla del núcleo conduce la corriente eléctrica al arco y suministra metal de aporte a la unión. Las funciones principales de la cobertura del electrodo son estabilizar el arco y proteger el metal derretido de la atmósfera por medio de los gases que se crean cuando el recubrimiento se descompone por el calor del arco. (Manual de Soldadura, 2004)

La protección empleada, junto con otros ingredientes de la cobertura y del alambre del núcleo, controla en gran medida las propiedades mecánicas, la composición química y la estructura metalúrgica del metal de soldadura, así como las características de arco del electrodo. La composición de la cobertura del electrodo varía dependiendo del tipo de electrodo.

La soldadura por arco de metal protegido es el proceso más ampliamente utilizado de los procesos de soldadura por arco. Aprovecha el calor del arco para derretir el metal base y la punta de un electrodo consumible cubierto. El electrodo y el trabajo forman parte de un circuito eléctrico que se ilustra en la figura 2.5. Este circuito comienza con la fuente de potencia eléctrica e incluye los cables de soldadura, un portaelectrodos, una conexión con la pieza de trabajo, la pieza de trabajo (soldamento) y un electrodo de soldadura por arco. Uno de los dos cables de la fuente de potencia se conecta al trabajo; el otro se conecta al portaelectrodos.



**Figura 2.5.** Elementos de un circuito de soldadura típico para soldaduras por arco eléctrico protegido. Fuente: Manual de Soldadura/ American Welding Society, 2004

La soldadura se inicia cuando se enciende un arco eléctrico entre la punta del electrodo y el trabajo. El intenso calor del arco derrite la punta del electrodo y la superficie del trabajo cerca del arco. En la punta del electrodo se forman con rapidez pequeños glóbulos de metal fundido, los cuales se transfieren a través del chorro del arco hasta el charco de soldadura fundida. De esta forma se deposita metal de aporte conforme el electrodo se va consumiendo. El arco se mueve sobre el trabajo con una longitud de arco y velocidad de desplazamiento apropiadas, derritiendo y fusionando una porción del metal base y añadiendo continuamente metal de aporte. Puesto que el arco es uno de los más calientes que producen las fuentes de calor comerciales [se han medido temperaturas por encima de 5000 °C (9000 °F) en su centro], la fusión del metal base se efectúa en forma casi instantánea al iniciarse el arco. Si las soldaduras se hacen en posición plana u horizontal, la transferencia de metal es inducida por la fuerza de la gravedad, la expansión del gas, fuerzas eléctricas y electromagnéticas y la tensión superficial. Si se suelda en otras posiciones, la gravedad actuará oponiéndose a las demás fuerzas.

El proceso requiere suficiente corriente eléctrica para derretir tanto el electrodo como una cantidad adecuada del metal base. También requiere un espacio apropiado entre la punta del electrodo y el metal base o el charco de

soldadura. Estos requisitos son necesarios para establecer las condiciones en que se llevará a cabo la coalescencia. Los temarios y tipos de los electrodos para soldadura por arco de metal protegido definen los requerimientos de voltaje (dentro del intervalo global de 16 a 40 V) y de amperaje (dentro del intervalo global de 20 a 550 A) del arco. La corriente puede ser alterna o continua, dependiendo del electrodo empleado, pero la fuente de potencia debe ser capaz de controlar el nivel de corriente dentro de un intervalo razonable para responder a las complejas variables del proceso de soldadura en sí. (Manual de Soldadura, 2004)

### Equipos Básicos (Fuente de potencia)

Se puede usar corriente alterna (CA) o bien continua (CC) para la soldadura por arco de metal protegido, dependiendo de la corriente suministrada por la fuente de potencia y del electrodo escogido. El tipo específico de corriente utilizada influye en el rendimiento del electrodo. Ambos tipos de corriente tienen ventajas y limitaciones, y éstas deben considerarse al seleccionar el tipo de corriente para una aplicación específica. Los factores que deben tenerse en cuenta son los siguientes:

1. Caída de voltaje. La caída de voltaje en los cables de soldadura es menor si se usa CA. Esto hace a la corriente alterna más apropiada cuando la soldadura debe efectuarse a cierta distancia de la fuente de potencia. Sin embargo, los cables largos que transportan CA no deben enrollarse porque las pérdidas inductivas que ocurren en tales casos pueden ser considerables.
2. Baja corriente. Si los electrodos son de diámetro pequeño y baja corriente de soldadura, la corriente continua ofrece mejores características de operación y un arco más estable.
3. Inicio del arco. En general, es más fácil encender el arco con CC, sobre todo si se usan electrodos de diámetro pequeño. Con CA, la corriente

de soldadura por ser cada medio ciclo, presenta problemas para el inicio y la estabilidad del arco.

4. Longitud del arco. La soldadura con arco corto (bajo voltaje de arco) es más fácil con CC que con CA. Esto es una consideración importante, excepto cuando se usan electrodos gruesos de hierro en polvo, pues en estos casos el profundo crisol formado por la cobertura gruesa mantiene automáticamente la longitud de arco correcta cuando la punta del electrodo se arrastra sobre la superficie de la unión.
5. Golpe del arco. La corriente alterna pocas veces presenta problemas de golpe del arco porque el campo magnético se está invirtiendo constantemente (120 veces por segundo). El golpe de arco puede ser un problema significativo cuando se suelda acero ferrítico con CC a causa de los campos magnéticos desequilibrados que rodean al arco.
6. Posición de soldadura. La corriente continua es un poco mejor que la alterna para soldaduras verticales o por encima de la cabeza porque permite usar un amperaje menor. Sin embargo, si se emplean los electrodos apropiados, es posible hacer soldaduras satisfactorias con CA en todas las posiciones.
7. Espesor del metal. Se puede soldar tanto metal laminado como secciones gruesas empleando CC. La soldadura de lámina metálica con CA es menos recomendable que con CC. Las condiciones del arco en los niveles de corriente bajos requeridos para materiales delgados son menos estables cuando se usa potencia CA que cuando se usa CC.

### **Materiales**

- Electrodos cubiertos

Además de establecer el arco y proporcionar metal de aporte para el depósito de soldadura, el electrodo introduce otros materiales en el arco o sus inmediaciones, o en ambos lugares. Dependiendo del tipo de electrodo que se use, la cobertura desempeña una o más de las siguientes funciones:

(1) Provee un gas para proteger el arco y evitar una contaminación excesiva del metal de aporte derretido por parte de la atmósfera.

(2) Suministra limpiadores, desoxidantes y agentes fundentes para purificar la soldadura y evitar un crecimiento excesivo de granos en el metal de soldadura.

(3) Establece las características eléctricas del electrodo.

(4) Proporciona un manto de escoria que protege el metal de soldadura caliente del aire y mejora las propiedades mecánicas, la forma de la franja y la limpieza superficial de dicho metal.

(5) Constituye un medio para añadir elementos de aleación que modifiquen las propiedades mecánicas del metal de soldadura

Las funciones 1 y 4 evitan la absorción de oxígeno y nitrógeno del aire por parte del metal de aporte derretido en el chorro del arco y del metal de soldadura mientras se solidifica y enfría.

Los electrodos cubiertos se clasifican de acuerdo con los requisitos de especificaciones emitidas por la Sociedad Americana de Soldadura. Ciertas agencias del Departamento de la Defensa de Estados Unidos también emiten especificaciones para los electrodos cubiertos. Los números de especificación de la AWS y las clasificaciones de electrodos correspondientes se dan en la tabla 2.6. Los electrodos se clasifican con base en la composición química o en las propiedades mecánicas, o ambas cosas, de su metal de soldadura sin diluir. Los electrodos de acero al carbono, acero de baja aleación y acero inoxidable también se clasifican de acuerdo con el tipo de corriente de soldadura con la que trabajan mejor, y en ocasiones de acuerdo con las posiciones de soldadura en las que pueden emplearse.

Tabla 2.6. Especificaciones de la AWS para electrodos cubiertos

Tipo de electrodo	Especificación AWS
Acero al carbono	A5.1
Acero de baja aleación	A5.5
Acero resistente a la corrosión	A5.4
Hierro colado	A5.15
Aluminio y aleaciones de aluminio	A5.3
Cobre y aleaciones de cobre	A5.6
Níquel y aleaciones de níquel	A5.11
Recubrimientos	A5.13 y A5.21

Fuente: Manual de Soldadura/ American Welding Society, 2004

#### Electrodo de acero resistente a la corrosión

Los electrodos cubiertos para soldar aceros resistentes a la corrosión se clasifican en ANSI/AWS A5.4, Especificación para electrodos de acero al cromo y al cromo-níquel, resistentes a la corrosión, cubiertos para soldadura. La clasificación dentro de esta especificación se basa en la composición química del metal de soldadura sin diluir, las posiciones de soldadura, y el tipo de corriente con la que se recomienda usar los electrodos. El sistema de clasificación es sencillo, tomando como ejemplo: E310-15 y E310-16, el prefijo E indica un electrodo. Los tres primeros dígitos se refieren al tipo de aleación (en cuanto a su composición química). Los últimos dos dígitos se refieren a la posición de soldadura y al tipo corriente para la que son apropiados los electrodos. El -1 indica que los electrodos pueden usarse en todas las posiciones hasta diámetros de 4 mm (5/32 pulg). El número 5 indica que los electrodos están hechos para usarse con CCEP (Corriente Continua Electrodo Positivo). El número 6 significa que los electrodos son apropiados tanto para CA como para CCEP (Corriente Continua Electrodo Positivo). Los

electrodos de más de 4 mm (5/32 pulg) de diámetro se usan en las posiciones plana y horizontal. (Manual de Soldadura, 2004)

La especificación no describe los ingredientes de la cobertura, pero las coberturas -15 por lo regular contienen una proporción elevada de piedra caliza (carbonato de calcio). Este ingrediente suministra el CO y CO<sub>2</sub> que sirven para proteger el arco. El aglutinante que mantiene unidos los ingredientes en este caso es silicato de sodio. La cobertura -16 también contiene piedra caliza para protección del arco, pero además suele contener bastante dióxido de titanio para mejorar la estabilidad del arco. El aglutinante en este caso probablemente será silicato de potasio.

Los aceros inoxidables pueden dividirse en tres tipos básicos: austeníticos, martensíticos y ferríticos. El grupo austenítico (2XX y 3XX) es, por mucho, el más grande. Normalmente, la composición del metal de soldadura de un electrodo de acero inoxidable es similar a la del metal base para el que fue diseñado el electrodo.

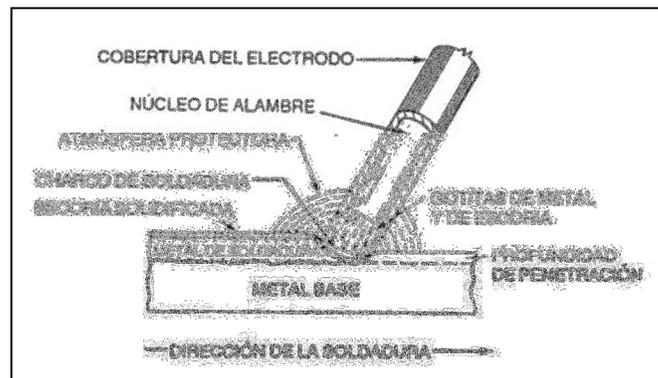
En el caso de los aceros inoxidables austeníticos, la composición del metal de soldadura difiere un poco de la del metal base con el fin de producir un depósito de soldadura que contenga ferrita (esto es, que no sea del todo austenítico) para evitar fisuras o agrietamiento en caliente del metal de soldadura. (Manual de Soldadura, 2004)

- Protección del arco

La acción de protección del arco, ilustrada en la figura 2.6, es en esencia la misma para todos los electrodos, pero el método específico de protección y el volumen de escoria producido varían de un tipo a otro. El grueso de los materiales de cobertura de algunos electrodos se convierte en gas por el calor del arco, y sólo se produce una pequeña cantidad de escoria. Los electrodos de este tipo dependen en buena medida de un escudo gaseoso para evitar la contaminación por parte de la atmósfera. El metal de soldadura

de tales electrodos puede identificarse por la capa incompleta o clara de escoria que cubre a la franja.

En los electrodos situados al otro extremo, el grueso del relleno se convierte en escoria por el calor del arco, y sólo se produce un volumen pequeño de gas protector. Los diminutos glóbulos de metal que se transfieren por el arco están cubiertos totalmente por una película delgada de escoria fundida, la cual flota a la superficie del charco de soldadura porque es más ligera que el metal. La escoria se solidifica después de hacerlo el metal de soldadura. Las soldaduras hechas con estos electrodos se identifican por los gruesos depósitos de escoria que cubren por completo las franjas de soldadura. Entre estos extremos hay una amplia variedad de tipos de electrodos, cada uno con una combinación diferente de protección por escoria y por gas. (Manual de Soldadura, 2004)



**Figura 2.6.** Soldaduras por arco de metal protegido.

Fuente: Manual de Soldadura/ American Welding Society, 2004

### **2.2.3 Corrosión**

Existen varias definiciones para la corrosión. Se puede decir que es el deterioro de un material por reacción química o electroquímica con su medio ambiente, sin embargo también es conocida como el reverso de la metalurgia extractiva.

Puesto que la corrosión es una reacción química, la velocidad a la cual ocurre dependerá hasta cierto punto de la temperatura y de la concentración de los reactivos y productos. Otros factores como el esfuerzo mecánico y la erosión también pueden contribuir a la corrosión.

En la corrosión, es usual referirse al ataque químico sobre los metales. Estos son susceptibles a este ataque debido a que tienen electrones libres y pueden establecer celdas electroquímicas dentro de su estructura.

Materiales no metálicos como las cerámicas y los polímeros no sufren el ataque electroquímico pero pueden experimentar un deterioro por ataque químico directo.

#### 2.2.4.1 Reacciones de óxido - reducción

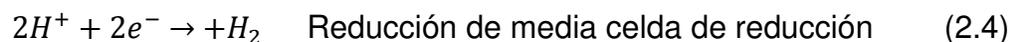
Considere un pedazo de metal de zinc situado en un matraz de ácido clorhídrico diluido. El zinc se disuelve o se corroe en el ácido y se produce cloruro de zinc y hidrógeno como se indica mediante la reacción química: (Smith et al, 2004)



Esta reacción puede escribirse en una forma iónica simplificada como:



Esta ecuación consta de dos medias reacciones: una para la oxidación del zinc y la otra para la reducción de los iones de hidrogeno para formar gas hidrogeno. Se pueden escribir como: (Smith et al, 2004)



- **Reacción de Oxidación:** La reacción de oxidación mediante la cual los metales forman iones que se transforman en una solución acuosa se denomina reacción anódica, y las regiones locales sobre la superficie metálica donde ocurre la reacción de oxidación reciben el nombre de

ánodos locales. En la reacción anódica se producen electrones que permanecen en el metal, y los átomos forman cationes. (Smith et al,2004)

- Reacción de reducción: La reacción de reducción es la que un metal o no metal se reduce en la carga de valencia se conoce como reacción catódica. Las regiones locales sobre la superficie metálica donde los iones metálicos o los iones no metálicos se reducen en carga de valencia reciben el nombre de cátodos locales. En la reacción catódica hay un consumo de electrones. (Smith et al,2004)
- Las reacciones de corrosión electroquímica implican reacciones de oxidación que producen electrones y reacciones de reducción que los consumen. Las reacciones tanto de oxidación como de reducción deben ocurrir al mismo tiempo y a la misma velocidad total para evitar la acumulación de carga eléctrica en el metal. (Smith et al,2004)

Una combinación de dos conductores eléctricos (electrodos) sumergidos en un electrolito es llamada Celda galvánica. Una celda galvánica convierte a la energía química en energía eléctrica. En un circuito tal como el de una celda, la corriente positiva fluye a través del conductor metálico de unión, desde el electrodo positivo al electrodo negativo.

#### 2.2.4.2 Energía libre

La tendencia a realizarse una reacción química viene dada por la variación de energía libre de Gibbs,  $\Delta G$  que puede considerarse como el motor de la reacción. En termodinámica, 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.

La reacción tiene lugar a expensas de la energía libre, cuando más negativo es el valor de  $\Delta G$  mayor es la posibilidad de que aquella tenga lugar.

La energía libre, a una temperatura constante, puede obtenerse mediante la reacción: (Bilurbina et al, 2003)

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2.5)$$

Dónde:

$\Delta G$  =Es el cambio de energía de Gibbs (Kj)

$\Delta H$  =Es el cambio de entalpía (Kj)

$T$  =Es la temperatura absoluta (K)

$\Delta S$  =Es el cambio de entropía (Kj/K)

Esta tendencia no mide la velocidad de corrosión, que depende de la cinética.

Tanto en el electrolito, como en los metales, donde está presente o existe un flujo de corriente, es válida la ley de Ohm o sea que cumple que:

$$I = \frac{E}{R} \quad (2.6)$$

Dónde:

$I$ =Intensidad de Corriente (A)

$E$ = Diferencia de potencial o Voltios (V)

$R$ =Resistencia en Ohmios

Teniendo en cuenta el mecanismo electrolítico de este proceso, esta tendencia a la corrosión puede expresarse en función del trabajo eléctrico efectuado y viene expresado como:

$$\Delta G = -E * n * f \quad (2.7)$$

$\Delta G$  = Es el cambio de energía de Gibbs (KJ)

$E$ = Es la f.e.m. de la pila de corrosión

$n$ = El número de electrones que participan en la reacción

$f$  = 96493 C (Constante de Faraday)

Una fuerza electromotriz positiva indican que los electrones van en el sentido indicado, si la reacción tiene lugar de forma espontánea, la variación

$\Delta G$  será negativa, de aquí proviene el signo negativo de la ecuación antes expuesta. (Bilurbina et al, 2003)

#### 2.2.4.3 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 aumento de  $30^\circ C$  en la temperatura.

Cuando la corrosión es acompañada por la evolución de hidrógeno, el incremento en la velocidad es más del doble para los  $30^\circ C$  de aumento de la temperatura. (Uzcategui, 2008)

#### 2.2.4.4 Efecto del pH

Dentro del rango de pH 4 a 10, la velocidad de corrosión es independiente del pH y depende de como el oxígeno se difunda rápidamente en la superficie del hierro. En este rango de 4 a 10 la longitud de la superficie catódica aparentemente no es importante.

Dentro del rango ácido o  $pH < 4$ , 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.

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 este a ser más pasivo. (Uzcategui, 2008)

La clasificación más general es:

- La corrosión húmeda, la cual ocurre cuando un líquido está presente, generalmente, envuelve soluciones acuosas o electrolitos.
- La corrosión seca, ocurre en la ausencia de la fase líquida, por encima del punto de rocío del medio ambiente, los corrosivos más usuales son gases y vapores. La presencia de pequeñas cantidades de humedad puede cambiar completamente el cuadro corrosivo.

#### 2.2.4.5 Clasificación de la corrosión

- Corrosión por picaduras

Esta es una forma de ataque extremadamente localizada que provoca huecos en el metal. Estos huecos pueden ser pequeños o grandes en diámetro, pero en la mayoría de los casos son relativamente pequeños y algunas veces aislados o muy estrechos semejando en este caso a una superficie rugosa.

Las picaduras gemelamente crecen en la dirección de la gravedad. La mayor parte de ellas se desarrollan y crecen hacia abajo en dirección perpendicular de las superficies horizontales.

Generalmente requieren de un periodo de inicio extenso antes de hacerse visibles. Las picaduras pueden ser consideradas como el estado intermedio entre la corrosión total y completa resistencia a la corrosión.

Entre los factores que afectan a la corrosión por picaduras se tienen:

- Composición de la solución: La mayoría de las fallas por picadura son causadas por el cloro y los iones que contiene cloro. Los cloruros están presentes en grados variables en las mayores partes de las aguas y soluciones acuosas. Muchos equipos operan en aguas de mar o aguas salinas. Los hipocloritos son difíciles de manejar por su alta tendencia a formar picaduras. También las picaduras están asociadas a los iones halógenos en la cual prevalecen los cloruros, bromuros e hipocloritos. Las picaduras pueden prevenirse o reducirse en muchos casos por la presencia de hidróxidos, cromatos o sales silícicas, sin embargo, estas sustancias tienen a acelerar la velocidad de las picaduras cuando se presentan en pequeñas concentraciones.
- Velocidad: Como generalmente están asociadas a las condiciones de estancamiento, tales como, un líquido en un tanque o un líquido atrapado en las partes bajas de un sistema de tuberías inactivas, luego de la

velocidad o el incremento de velocidad hacen decrecer el ataque por picaduras.

- *Variables metalúrgicas*: Los aceros inoxidable son más susceptibles al desgaste por picaduras que muchos otros grupos de metales y aleaciones. Los inoxidables como 304 o 316 en el rango de temperaturas de sensitización disminuyen su resistencia a las picaduras. Los aceros austeníticos presentan la mayor resistencia a la corrosión cuando la solución es mantenida por encima de 980°C. Los trabajos en frío incrementan el ataque por picaduras de los aceros inoxidables en Cloruro Férrico.

En vista de que la picadura es una forma localizada de corrosión, los ensayos convencionales de pérdida en peso, no pueden ser usados para la evaluación. La pérdida de metal es muy pequeña y no indica la profundidad de penetración. Generalmente, se mide la profundidad máxima de la picadura, pero, tal medida nunca puede ser usada para predecir la vida de un equipo, ya que la profundidad de la picadura es una función del tamaño de la muestra. La profundidad de la picadura algunas veces es expresada por el factor de Pitting.

Los materiales que muestran picaduras o tendencia a picarse no pueden ser usados para la construcción de plantas y equipos. Añadiendo inhibidores también se protege contra las picaduras, pero esto puede ser un procedimiento peligroso a no ser que el ataque sea detenido completamente pero si esto no ocurre la intensidad de la picadura aumenta. (Uzcategui, 2008)

- *Corrosión en grietas y condiciones estancadas*

Es un tipo de corrosión intensamente localizado y frecuentemente ocurre dentro de grietas y otras áreas en superficies metálicas expuestas a la corrosión.

Pequeños depósitos de arena, lodo, productos de corrosión y otros sólidos pueden actuar iniciando a este tipo de corrosión, ya que ellos actúan como defensa, pero crean por debajo condiciones de estancamiento que dan lugar a este tipo de corrosión. (Uzcategui, 2008)

Para funcionar como una zona de corrosión, una grieta debe ser lo suficientemente ancha como para permitir que un líquido entre, pero lo suficientemente angosta como para mantener una zona de estancamiento.

- Corrosión por esfuerzos

Se refiere a la fractura, agrietamiento o falla causados por la presencia simultánea de esfuerzos de tensión y un medio corrosivo específico.

Los esfuerzos para este tipo de corrosión pueden provenir de diferentes fuentes como son: esfuerzos aplicados, residuales, térmicos o por soldadura. Este tipo de corrosión es observado en varios medios acuosos, pero también ocurre en ciertos metales líquidos, sales fundidas y líquidos orgánicos no acuosos. La presencia de oxidantes tiene influencia pronunciada en el agrietamiento.

La susceptibilidad al agrietamiento por esfuerzos es afectada por la composición química promedio, la orientación preferencial de los granos, composición y distribución de precipitados de las dislocaciones y el progreso de las transformaciones de fase. (Uzcategui, 2008)

- Corrosión intergranular

Los efectos de los límites de grano son de poca o ninguna consecuencia en muchas aplicaciones o usos de los metales. Si un metal se corroe resulta un ataque uniforme, ya que los límites de grano son generalmente mucho más reactivos que la matriz. Sin embargo bajo ciertas condiciones, las interfaces de los granos son muy reactivas y resulta una corrosión intergranular. Este tipo de corrosión puede ser causada por impurezas en los límites de granos, enriquecimiento de uno de los límites de

los elementos de la aleación, o existe la escasez de uno de los elementos en las áreas de los límites de grano. (Uzcategui, 2008)

#### 2.2.4.6 Corrosión Atmosférica

Esta forma de corrosión generalmente se produce por desgaste superficial uniforme. Para el acero, ésta es la forma casi exclusiva de corrosión, salvo en algunos casos muy particulares de localización como ocurre en el aire marítimo, con fuerte humedecimiento y pulverización de agua salada, en la cuales se forman picaduras, perforaciones o ataques intercrystalinos que sólo se observan ocasionalmente y en muy pequeñas proporciones.

Con la excepción de los casos particulares citados, se puede establecer que en el ataque atmosférico predomina casi siempre el desgaste superficial uniforme, hecho que puede tomarse como característico de la acción atmosférica. (Uzcategui, 2008)

#### *Factores que afectan la corrosión en la atmosfera*

- Humedad Relativa (HR)

Se ha comprobado experimentalmente que la velocidad de corrosión del hierro aumenta al crecer la humedad relativa a partir del 60,70%, especialmente, si la atmósfera está contaminada, el incremento es importante.

Esta humedad a partir de la cual la corrosión experimenta aumento importante, se conoce como humedad crítica; este valor varía según la contaminación y el metal.

La presencia de contaminantes solubles (sulfatos, cloruros) sobre la superficie metálica reduce el nivel de HR necesario. (Bilurbina et al, 2003)

Se han hecho muchos intentos para representar por medio de funciones la variación de la corrosión con la HR. Baston y Bartanova (1969) propusieron:

$$V_e = V_{e100}(H_x H_e / H_{100} H_e)^2 \quad (2.8)$$

Dónde:

$V_e$  = Velocidad de oxidación crítica a HR > Crítica

$V_{e100}$  = Velocidad de oxidación al 100% de HR

$H_x$  = HR ambiental

$H_e$  = HR crítica

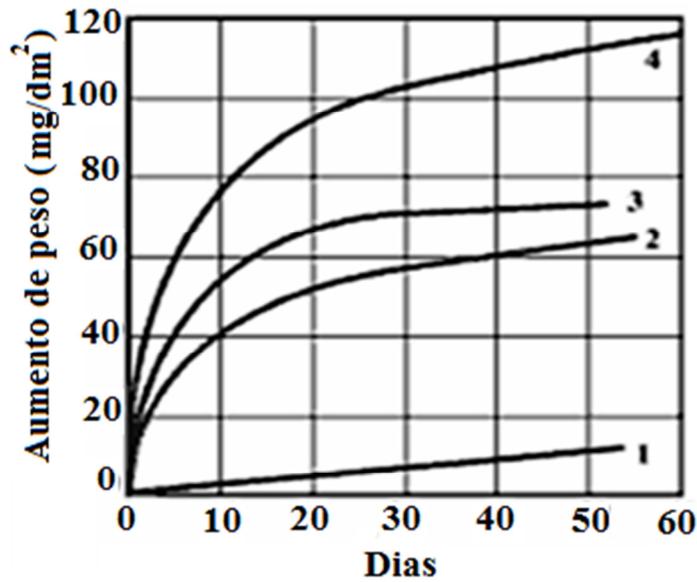
La difusión del oxígeno a través de la capa acuosa es generalmente el factor que controla la velocidad de corrosión. (Bilurbina et al, 2003). Esta velocidad aumenta al disminuir el espesor de la capa acuosa pasando por el máximo, pero después disminuye por el aumento de la resistencia óhmica de las películas muy delgadas.

Para simplificar, se puede imaginar la corrosión como un resultado del producto de dos factores: un tiempo global de humectación y una velocidad media de ataque. Como es lógico, el valor de la velocidad media depende del metal, del tipo y grado de contaminación atmosférica, de la temperatura y condiciones de exposición del metal. (Bilurbina et al, 2003)

- Contaminación

Los contaminantes que más pueden influir sobre la corrosión atmosférica son el óxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y el cloro (Cl). En relación al dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), que los primeros investigadores pensaban que tenía gran influencia, Vernon (1935) demostró que realmente disminuía la corrosión, probablemente porque favorecía la formación de una película de óxido más estable. (Bilurbina et al, 2003).

Otro contaminante importante son los cloruros; como siempre, para que se acelere el proceso de corrosión es necesario que la superficie metálica esté húmeda. El valor de la HR a partir de la cual la sal empieza a absorber agua de la atmósfera parece que es el valor crítico desde el punto de vista de corrosión (70-75 por ciento). Ver figura 2.9



**Figura 2.9.** Corrosión de acero con NaCl

1.- 58% 2.- 70% HR 3. 80% HR 4.- 89% HR 5.- 94% HR.

Fuente: Bilurbina et al, 2003

- Temperatura

Este tipo de corrosión está regulada por la difusión de oxígeno. La difusión de la corrosión en un sistema abierto por encima de los 80°C está ligada con la disminución de la solubilidad del oxígeno a medida que aumenta la temperatura.

Si la corrosión tiene lugar con el desprendimiento de hidrógeno, el aumento de velocidad es superior por ejemplo la velocidad de corrosión del hierro con HCl se duplica por cada 10°C de aumento de temperatura. (Bilurbina et al, 2003)

- Polvo Atmosférico

Cuando las partículas de polvo son higroscópicas contribuyen a incrementar el efecto corrosivo sobre los metales. También actúan como agentes químicos ya que pueden contener partículas de carbón, óxidos metálicos etc.

Se pueden clasificar en partículas inertes no absorbentes, partículas absorbentes, partículas salinas (tales como sal marina, sulfato de amonio que proveen electrolitos higroscópicos que participan directamente en las reacciones de corrosión atmosférica), polvos en suspensión y sedimentables. (Uzcategui, 2008)

- Películas de óxidos y su influencia

La intensidad de corriente metálica en la atmósfera depende de lo compacto que sea la capa de óxido formado y el volumen que ocupe.

- Efecto de las precipitaciones

Provocan la humectación de la superficie, metálica, arrastran las partículas de contaminantes atmosféricos que se han posado sobre las partes metálicas y arrastran o disuelven las películas de productos de corrosión, disminuyendo sus cualidades protectoras. (Uzcategui, 2008)

#### 2.2.4.7 Corrosión por agua de mar

El agua de mar contiene cerca de 3,4 % de NaCl (Cloruro de sodio), es ligeramente alcalina de pH 8, es un buen electrolito y puede causar corrosión galvánica, por estancamiento, entre otros y esta corrosión se ve afectada por el contenido de oxígeno, la velocidad, temperatura y organismos biológicos. En un material expuesto al agua de mar, el máximo ataque ocurre en la zona humedecida o salpicada, o rociada debido al humedecimiento y secado alternado y a la aireación. En el mar a grandes profundidades, generalmente la corrosión disminuye debido a la temperatura que es baja, cerca de 4 a 5°C. Las agua salinas, son aguas contenidas en cloruros. (Uzcategui, 2008)

#### 2.2.5. Cámara de Niebla Salina

En el diseño de equipos a la intemperie se hace necesario un estudio sobre el fenómeno de la corrosión para determinar cuál material cumple con las exigencias de diseño y resistencia a la atmósfera o medio ambiente de

trabajo que producen y aceleran su degradación, desgaste, cambios en su estructura y propiedades mecánicas afectando su calidad y desempeño. Para lograrlo se han desarrollado durante muchos años gran variedad de procedimientos para estudiar el comportamiento de los materiales frente a la corrosión, entre los cuales se encuentran:

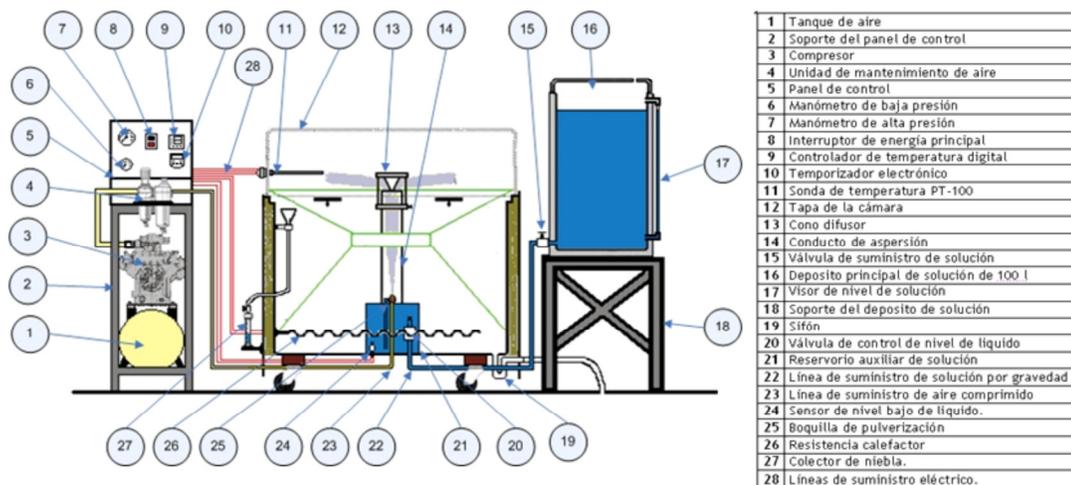
- Inmersión total o parcial: Este ensayo suele utilizarse para producir condiciones naturales que se dan en ambientes corrosivos.
- Ensayos de Simulación Atmosférica: Son aquellos ensayos de laboratorio que se usan para producir tipos de corrosión que se dan al exponer las aleaciones a los distintos tipos de atmósferas en su uso normal.
- Exposición a Vapores Nítricos: Consiste en colocar las probetas suspendidas sobre un Erlenmeyer de cuello largo lleno parcialmente de ácido nítrico a 50°C. Este método se ha empleado principalmente para evaluar la resistencia de algunos cromados y latones a ciertas atmósferas industriales en las cuales el agente corrosivo suele ser vapores nítricos.
- Atmósferas Húmedas: Este tipo de ensayos son especiales para simular condiciones en regiones tropicales por medio de condensación de agua, debido a cambios ostensibles de temperatura, y así estudiar efectos de agentes corrosivos que secos son inofensivos al metal. Entre los de este tipo se encuentran los ensayos de niebla salina.

Para los ensayos de niebla Salina, se emplea un cámara de niebla salina, equipo de laboratorio planteado para realizar ensayos de corrosión de forma acelerada, el cual proporciona una atmósfera corrosiva formada por una niebla salina, controlando las variables que intervienen en este proceso.

El ensayo de niebla salina consiste en exponer la pieza objeto del ensayo a una niebla salina durante un cierto período de tiempo en el interior de la cámara, bajo condiciones controladas. El tiempo transcurrido desde que se introdujo la pieza hasta que comienza el ataque de la corrosión, proporciona una medida de la capacidad de resistencia del metal constituyente o del recubrimiento a dicho ataque.

Las condiciones que se recrean dentro de la cámara son:

- Rango de temperatura 33,7 - 37 °C.
- Rango de presión (flujo constante): entre 10 psi y 25 psi, libre de impurezas y aceite.
- Humedad relativa: 95%-98%
- Posición de las probetas: entre 15° y 30° respecto a la vertical.
- Deposition de niebla (condensado): de 1 a 2 ml/h en un área de 80cm<sup>2</sup>.



**Figura 2.10.** Esquema de partes de una Cámara de Niebla Salina

Fuente: Carlos Arias Córdoba, et al, 2007

Este modelo consta de un recipiente aislado térmicamente en el que se colocan unos soportes porta probetas. Pero para que éste produzca los resultados esperados es necesario implementar un sistema de suministro que permita generar la niebla que establece la norma.

- Pulverizador: Un pulverizador es un dispositivo en el que al pasar una corriente de aire a través de un pequeño orificio, se producen en éste, velocidades tales que su presión llega a ser suficientemente pequeña, de tal manera que la diferencia de presión actúe como una fuerza impulsadora que haga fluir hasta la boquilla, el líquido que se va a pulverizar.
- Aprovisionamiento de Solución Salina: La solución salina es, de acuerdo con la norma ASTM B 117, 4% a 6% de NaCl disuelto en agua destilada; la cantidad de niebla debe ser tal que, en un área colectora horizontal de 80 cm cuadrados, se produzca una deposición de 1 a 2 mililitros por hora de pulverización continua. La solución se prepara disolviendo 5 +/- 1 partes por peso de cloruro de sodio en 95 partes de agua destilada que no contenga más de 200 ppm de sólidos en total. El cloruro de sodio deberá estar sustancialmente libre de impurezas y de otros elementos que impidan al atomizador su función normal.
- Sistema de suministro de aire al pulverizador: El pulverizador de la cámara requiere que se le alimente una cantidad de aire por unidad de tiempo con unas condiciones de presión, temperatura y humedad, según lo determinan las normas rectoras (ASTM B 117 Y ASTM B 287). Estas condiciones se dan a través de un compresor con una presión entre 1 y 5 atmósferas.
- Dispositivo para humedecer el aire hasta las condiciones requeridas: Hasta aquí el modelo cuenta con un sistema generador de niebla, el cual está provisto de los elementos para su propósito, pero es necesario implementar un sistema que acondicione el aire de tal manera que al expandirse el pulverizador quede a las condiciones de

humedad y temperatura requeridas. Además se debe tener en cuenta el control de humedad y un elemento calefactor de la cámara.

- Tanque de reserva de solución salina: Este tanque va conectado al tanque alimentador del aspersor; debe tener una capacidad de almacenamiento para trabajo mínimo de 24 horas.
- Tanque de reserva de agua: Permite mantener con el nivel óptimo de agua a la torre, para su funcionamiento normal.

### **2.2.6 Ensayo de Tracción**

El ensayo de tracción en ingeniería es ampliamente utilizado, pues suministra información sobre la resistencia de los materiales utilizados en el diseño y también para verificación de especificaciones de aceptación. Todos los materiales metálicos tienen una combinación de comportamiento elástico y plástico en mayor o menor proporción.

Con el ensayo de tracción se busca obtener información, sobre los esfuerzos de la junta soldada y de la ductilidad de la misma. A la vez, se obtendrá información sobre el esfuerzo último, esfuerzo de fluencia, porcentaje de elongación y porcentaje de reducción de área.

La norma ASTM E8M-04, establece para este ensayo un número de tres (3) probetas, sin embargo para disminuir errores sistemáticos y prever posibles eventualidades, se considerara una probeta adicional para cada condición. Luego, se toma el promedio de las propiedades mecánicas determinadas por el ensayo, para las probetas que presenten la menor dispersión.

Las propiedades mecánicas que se pueden obtener a partir del ensayo de tracción teórico, son:

- *Módulo de Elasticidad:* En la primera parte del ensayo de tracción, el material se deforma elásticamente. Es decir, si la fuerza que actúa sobre la muestra desaparece, la probeta volverá a su longitud inicial. En general los metales y aleaciones muestran una relación lineal entre la tensión aplicada y a deformación producida en la región elástica del diagrama convencional que se describe por la ley de Hooke. (Smith, 2006)

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2.9)$$

Dónde:

E: Modulo de Elasticidad (unidades Pa o psi)

$\sigma$ : Tensión

$\epsilon$  : Deformación

- *Limite Elástico:* Es el nivel de tensión al que un metal o aleación muestran una deformación platica significativa. Debido a que no hay un punto definido de la curva tensión-deformación donde acaba la deformación elástica y empieza la deformación platica, se determina el límite elástico como la tensión a la que se produce una deformación elástica definida. En muchas ocasiones se determina el límite cuando se produce una deformación de 0,2 por ciento.

El límite elástico de 0,2 por ciento, también denominado limite elástico de 0,2 por ciento, se determina a partir del diagrama convencional. Primero se traza una línea paralela a la zona elástica (lineal) del diagrama convencional a una deformación e 0,002 pulg/pulg (m/m). Después se traza una línea horizontal desde el punto de intersección entre la línea anterior y la parte superior de la curva tensión-deformación hasta que alcance el eje de las tensiones. El límite elástico de 0,2 por ciento es el valor de tensión donde la línea horizontal interseca el eje de tensión (Smith, 2006).

- Resistencia a la tracción. Es la máxima tensión que se alcanza en la curva tensión- deformación. Se determina trazando una línea horizontal desde el punto máximo de la curva tensión - deformación hasta el eje de tensiones. El valor de tensión donde esa línea interseca al eje de tensiones se denomina resistencia máxima o resistencia a la tracción. (Smith, 2006)
- Porcentaje de alargamiento: El porcentaje de alargamiento que una probeta a tracción soporta durante el ensayo proporciona un valor de ductilidad del metal (Smith, 2006). Este se calcula mediante la ecuación 2.10.

$$\% \Delta L = \left( \frac{L_f - L_o}{L_o} \right) \cdot 100\% \quad (2.10)$$

Dónde:

$\% \Delta L$  : Porcentaje de elongación (%)

$L_f$  : Longitud final (mm)

$L_o$  : Longitud inicial (mm)

- Porcentaje de estricción: La ductilidad de un metal o aleación también se puede expresar en términos de porcentaje de reducción de área o estricción (Smith, 2006). Este se calcula a partir de la ecuación 2.11.

$$\% \Delta A = \left( \frac{A_o - A_f}{A_f} \right) \cdot 100\% \quad (2.11)$$

Dónde:

$\% \Delta A$  : Porcentaje de reducción de área (%)

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

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

Para obtener el área Inicial y/o final para sección rectangular se utiliza la ecuación 2.12.

$$A_o = W \cdot T \quad (2.12)$$

Dónde:

$A_o$ : Área transversal en la sección reducida ( $mm^2$ )

$W$ : Ancho de la sección reducida ( $mm$ )

$T$ : Espesor de la sección reducida ( $mm$ )

Del ensayo de tracción se obtiene la curva carga-alargamiento, a partir de la cual se obtiene la curva Esfuerzo- Deformación Ingenieril, la cual se define a partir de la sección transversal original del espécimen de prueba y de su longitud inicial como lo indican las ecuaciones 2.13.

$$S = \frac{F}{A_o} \quad y \quad e = \frac{\Delta L}{L_o} \quad (2.13)$$

Dónde:

$S$ : Esfuerzo Ingenieril (MPa)

$F$ : Carga (N)

$A_o$ : Área inicial de la sección calibrada ( $mm^2$ )

$e$ : Deformación Ingenieril (mm/mm)

$\Delta L$ : Variación de la longitud de la sección calibra instantánea (mm)

$L_o$ : Longitud inicial (mm)

### **2.2.7 Ensayo de Metalografía**

Es una técnica avanzada que se basa en la amplificación de la superficie mediante instrumentos ópticos (microscopio) para observar las características estructurales microscópicas (microestructura). Este tipo de examen permite realizar un estudio que pone en evidencia la estructura o los

cambios estructurales. La realización de este ensayo se rige bajo la norma ASTM E0003-01.

### **2.2.8 Ensayo de Impacto**

El Ensayo de Impacto permite determinar la capacidad de un material para resistirse al impacto sin ser fracturado, la tenacidad es la medida de la cantidad de energía que un material puede absorber antes de fracturarse. Se calcula la resistencia al impacto de cada probeta a través de la siguiente ecuación 2.14.

$$RI = \frac{E_I - E_{aire}}{L * a} \quad (2.14)$$

Dónde:

$RI$  = Resistencia de Impacto

$E_I$  = Energía Absorbida por la probeta

$E_{aire}$  = Energía Absorbida por el aire

$L$  = Alto de la probeta

$a$  = Alto de la muesca

### **2.2.9 Ensayo de Microdureza Vickers**

El ensayo Vickers es una prueba de dureza por penetración, en la cual se usa una máquina calibrada para aplicar una carga por medio de un penetrador (indentador) piramidal de diamante sobre la superficie del material bajo prueba.

El ensayo consiste en hacer sobre la superficie de una probeta una huella con un penetrador en forma de pirámide recta de base cuadrada con determinado ángulo entre las caras opuestas, y medir las diagonales de dicha huella después de quitar la carga (Ibarra, 2002).

El número de dureza Vickers (HV) relaciona la carga aplicada y el área de la superficie dejada por la huella después de iniciar la carga. Este se obtiene a partir de la ecuación 2.15.

$$HV = 1,8544 * \frac{P}{d^2} \quad (2.15)$$

Dónde:

$HV$  = Número de Dureza Vickers

$P$  = Carga aplicada (kgf o N)

$d$  = Diagonal promedio de la huella.

Donde la diagonal promedio se obtiene a partir de la ecuación 2.16

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (2.16)$$

# CAPÍTULO 3

## *Marco Metodológico*

---

---

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

Para dar respuesta a la problemática planteada, se deben establecer los niveles de estudio. Esta investigación, atendiendo a sus objetivos, se caracteriza por ser del tipo experimental; donde el investigador no sólo identifica las características que se estudian sino que las controla, las altera o manipula con el fin de observar los resultados al tiempo que procura evitar que otros factores intervengan en la observación (Grajales, 2000); ya que a través de ensayos de laboratorio se busca recrear el ambiente corrosivo para el acero seleccionado, mediante la utilización de muestras representativas de materiales, control de variables y análisis de datos. Por otro lado la investigación es explicativa; la cual se centra en buscar las causas o los por qué de la ocurrencia del fenómeno (Córdova, 2007), ya que se busca no sólo describir sino buscar el sentido al comportamiento de las variables y las relaciones existentes entre éstas. Se busca conocer las causas de los fenómenos ocurridos y bajo qué condiciones estos se producen una vez que finalice el estudio de corrosión del acero bajo una solución salina expuesta a los tres periodos de tiempo diferentes.

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

La estrategia que se adopta para resolver el problema planteado es la investigación experimental; la cual consiste en someter a un objeto o grupo de individuos a determinadas condiciones, estímulos o tratamiento (variable independiente), para observar los efectos o reacciones que se producen (variable dependiente) (Sabino, 2000). Se realizaron ensayos de laboratorio donde se sometieron las muestras a una condición dada y se observaron los efectos producidos.

Por otro lado, también se aplica la investigación documental; la cual consiste en un proceso basado en la búsqueda, recuperación, análisis, crítica e interpretación de datos secundarios. Como en toda investigación, el propósito de este diseño es el aporte de nuevos conocimientos (Sabino, 2000). Al respecto, se utilizó información de sitios en internet, revistas electrónicas, consultas bibliográficas, trabajos de investigación y entrevistas como base para la resolución del problema.

### **3.3. Técnicas e instrumentos de la recolección de datos**

La técnica de recolección de datos es la observación directa de los ensayos realizados. Los resultados de las experiencias se recopilaron en formatos establecidos tales como tablas, gráficos y fotografías. Estas técnicas se aplicaron a los ensayos de corrosión, tracción, impacto, dureza y metalografía. Por otro lado la realización de estos ensayos se realizó bajo las normas establecidas para justificar su validez.

### **3.4. Técnicas de procesamiento de datos**

Se aplicó el análisis comparativo a los datos recolectados. Se procedió a comparar los resultados obtenidos en la realización de ensayos con probetas expuestas al medio corrosivo y ensayos con las probetas no expuestas al medio corrosivo. Comparación que permitió determinar cómo varían las propiedades mecánicas bajo el ambiente corrosivo.

### 3.5. Adquisición del material de estudio

El material que se utilizó para la realización de los ensayos fue suministrado por la empresa Pequiven (Petroquímica de Venezuela S.A), empresa que se dedica básicamente a la manufactura de Urea, SAM (Sulfato de Amonio) y fertilizantes Granulados NPK/NP. La empresa donó tres (3) láminas de acero A 283 grado B cuya composición química y propiedades mecánicas teóricas se muestran en la tabla 2.1, las cuales son utilizadas en la empresa para el reemplazo del fondo de la torre de absorción final del proceso de producción de ácido sulfúrico. Las dimensiones de las láminas fueron las siguientes:

- Primera Lámina: Largo 420 mm, ancho 300 mm y espesor ½ pulg.
- Segunda Lámina: Largo 275 mm, ancho 70 mm y espesor ½ pulg.
- Tercera Lámina: Largo 300 mm, ancho 50 mm y espesor ½ pulg.

Es importante resaltar que el material de las láminas utilizadas, proviene de la misma colada.

### 3.6. Elaboración de las probetas

Las probetas se realizaron a partir de las láminas de acero ASTM A 283 grado B anteriormente descritas.

#### 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 de tracción se tomó la primera lámina (Largo 420 mm, ancho 300 mm y espesor ½ pulg.) de acero ASTM A 283, por ser la lámina de mayor largo. Luego se procedió a cortarla por la mitad.

### Material de probetas para ensayo de impacto.

Para las probetas de impacto se tomó la segunda lámina (Segunda Lámina: Largo 275 mm, ancho 70 mm y espesor ½ pulg.) de acero ASTM A 283. Luego se procedió a cortarla por la mitad.

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

Las probetas para los ensayos de dureza y metalografía serán las mismas, ya que la naturaleza de los ensayos así lo permite.

#### 3.6.2. Procesos de elaboración de juntas las soldadas

Las láminas una vez cortadas deberán unirse por medio del proceso de soldadura. En la presente investigación se utilizará el proceso de soldadura GTAW Y SMAW por ser el objeto de estudio.

##### 3.6.2.1 Equipos utilizados

- Máquina de Soldar marca Miller, modelo Dimensión 652. Ver figura 3

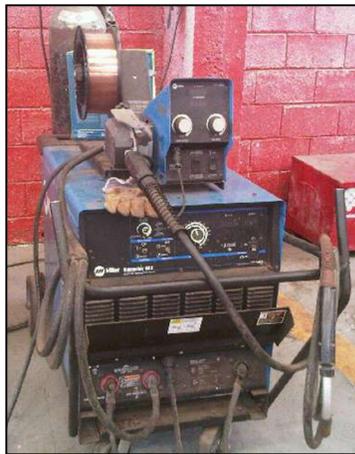


Figura 3.1. Máquina para soldar utilizada

Fuente: Propia, 2010

- Máscara para soldar

- Recipiente colector de gas inerte
- Mesa de sujeción
- Guantes de protección

#### 3.6.2.2 Materiales utilizados

- Electrodo de Tungsteno EWTh-2 (color rojo, 2% Torio), de diámetro 2,4 mm (3/38 in)
- Electrodo E309-16 (acero resistente a la corrosión) de diámetro 4mm (5/32 in)
- Gas Argon al 100%, AWS AG-S

#### 3.6.2.3 Parámetros de la soldadura

Los parámetros empleados para este procedimiento, se describen en el Procedimiento D140302017 (ver anexos), de la Empresa PEQUIVEN S.A. para la elaboración del Proyecto “*Reemplazo del Cabezal inferior de la torre de Absorción final de la Planta de Acido Sulfúrico de Pequiven Morón*”, el cual basa en el Código ASME, Normas ASTM, Manual de soldadura (American Welding Society) y el Manual de Normas y Procedimiento de Pequiven.

El gas protector utilizado fue el argón, debido a su acción de un arco más uniforme, menor penetración, menor costo y mayor disponibilidad y es el recomendado para su aplicación según Manual de Soldadura de la American Welding Society, de acuerdo a las variables del proceso. El flujo de gas protector es de 12-15 l/min; valor seleccionado dentro del rango permisible por el Manual de Soldadura. Como se empleó corriente continua, para el electrodo de tungsteno se empleó una polaridad inversa.

A continuación se muestran en la tabla 3.1, 3.2 y 3.3 las especificaciones del proceso de soldadura. Estos parámetros fueron

seleccionados según el manual de soldadura de la Sociedad Americana de Soldadura, basándose en el material a utilizar y el propósito del mismo.

Tabla 3.1 Técnicas empleadas para el proceso

<b>Tipo de Cordón:</b>	<b>Recto 1er Pase/ Ondulado-Resto</b>
Pase simple o múltiples:	Múltiples
Limpieza de Pases:	Cepillo /Esmeril
Oscilación:	Mínima requerida en GTAW / 2,5 veces diámetro, electrodo max. en SMAW.

Fuente: Pequiven

Tabla 3.2. Especificaciones del proceso de soldadura

<b>Pase de Soldadura</b>	<b>Proceso</b>	<b>Metal de Aporte</b>		<b>Corriente</b>	
		Clase	Diam.	Polaridad	Amperaje
1er Pase	GTAW	ER309	1/8	DC(-)	100-130
2do Pase	SMAW	E309-16	5/32	DC(+)	120-150
Resto	SMAW	E309-16	5/32	DC(+)	120-150
COVER PASS	SMAW	E309-16	5/32	DC(+)	120-150

Fuente: Pequiven

Tabla 3.3. Parámetros de Gas a utilizar

	<b>Tipo</b>	<b>Porcentaje de mezcla</b>	<b>Flujo (L/min)</b>
Protección	Argón	100%	12-15
Purga	Argón	100%	10-18
Diámetro de la boquilla de gas: 3/8 in			

Fuente: Pequiven

### 3.6.3. Elaboración de las probetas de tracción

Para la elaboración de las probetas del ensayo de tracción, se debe cumplir con las especificaciones de la norma ASTM E 8M-04 (Ensayo de tracción para materiales metálicos) y AWS B4.0 (Ensayo de tracción para

probetas soldadas), Por lo tanto se debe constatar las dimensiones para cumplir con ambas normativas.

La norma ASTM E 8M-04 presenta para las probetas planas, tres tipos de dimensiones, éstas pueden ser: Tipo Plana (Sheet), Placa (Plate) y pequeño tamaño (Subsize). Las dimensiones de las probetas Sheet (probeta seleccionada) se muestran en la figura 3.2 y en la tabla 3.4

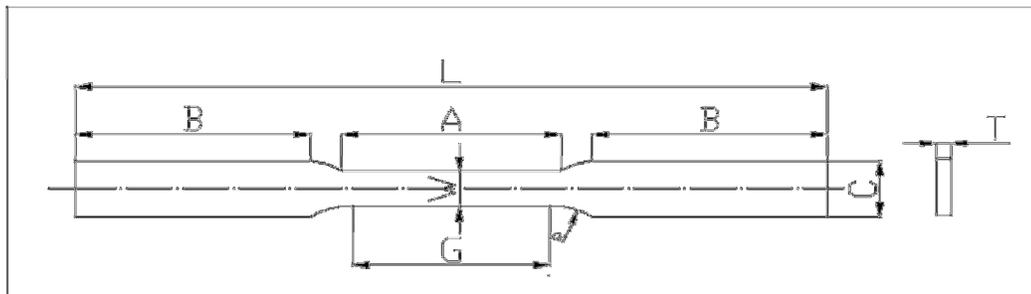


Figura 3.2. Probeta Estándar para Ensayo de tracción  
Fuente: Norma ASTM E 8M-04

Tabla 3.4. Dimensiones Estándar para la probeta tipo Sheet

Denominación	Dimensión (mm)
G - Longitud Calibrada	50 ± 0,1
W - Ancho	12,5 ± 0,1
T - Espesor	Espesor del material
R - Radio del filete	12,5
L- Longitud total	200
A – Longitud de la sección reducida	57
B – Longitud de la sección de agarre	50
C – Ancho de la sección de agarre	20

Fuente: Norma ASTM E 8M-04

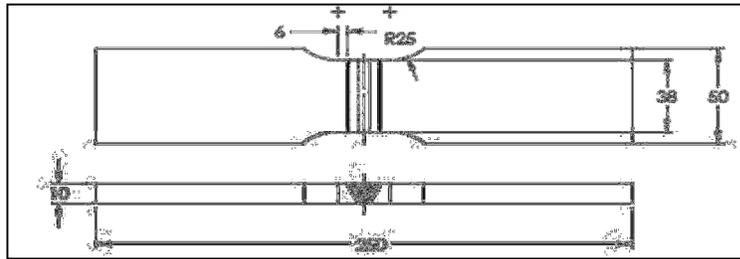


Figura 3.3. Probeta estándar para Ensayo de tracción de probetas soldadas AWS

Fuente: Norma AWS B4.0

Como resultado, las medidas seleccionadas para las probetas de tracción que cumplen con las normativas expuestas por la ASTM y AWS, son las siguientes:

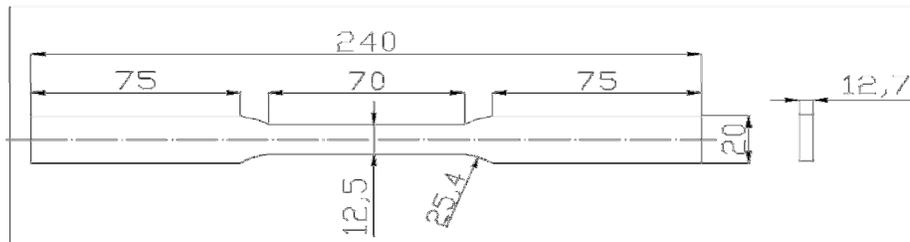


Figura 3.4. Dimensiones para probetas de Ensayos de tracción (mm)

(Unión soldada en la mitad de la longitud calibrada)

Fuente: Propia, 2010

Las probetas se realizaron de las secciones de las láminas soldadas donde se observó en mejor estado la soldadura, obteniendo de las mismas un total de dieciséis (16) probetas, las cuales se emplearon cuatro (4) por cada tiempo de exposición (tres periodos) y cuatro (4) para determinar las propiedades mecánicas del material antes de la corrosión, como se muestra en la figura 3.5.



Figura 3.5. Muestra tipo Sheet para los ensayos de tracción

Fuente: Propia, 2010

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

La norma ASTM para ensayos de metalografía (ASTM E0003-01) y ensayos de dureza Vickers (ASTM E92-82), no precisa dimensiones específicas. Sin embargo como la mitad de las probetas se llevaron a la Cámara Salina para el proceso de corrosión, se seleccionaron las dimensiones mínimas de la misma: veinticinco (25) milímetros de largo, trece (13) milímetros de ancho y tres (3) milímetro de espesor.

Se realizaron un total de veinte (20) probetas para los ensayos de dureza y metalografía, lo cual implica quince (15) probetas para los tres (3) periodo de exposición a la corrosión y cinco (5) para la caracterización del material y la determinación de la propiedades iniciales.

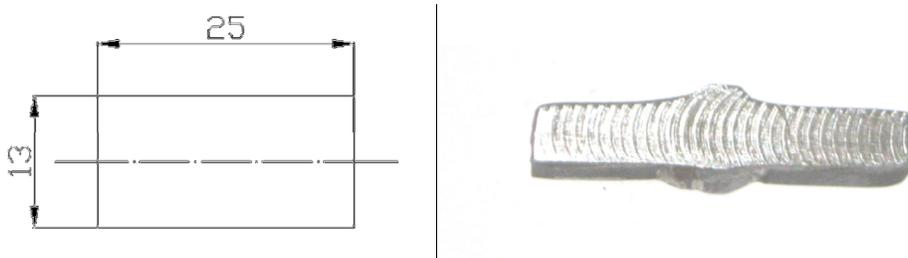


Figura 3.6. Dimensiones para probetas de Ensayos de dureza y metalografía

Fuente: Propia, 2010

La unión soldada se encuentra en el medio de la sección, a lo largo de la sección longitudinal de la probeta.

#### 6.3.5. Elaboración de probetas para el Ensayo de impacto

La Norma ASTM en su artículo E23-02 (Método Estándar para Ensayos de Impacto de materiales metálicos), establece las dimensiones de las probetas requeridas para este ensayo. La normativa divide las probetas para ensayo Charpy en tres tipos: Tipo A, Tipo B y Tipo C.

Se empleó el tipo de probeta: Tipo A, donde el cordón de soldadura se encuentra en la mitad de la misma, es decir, donde se encuentra la

muesca. Se realizaron dieciocho (18) probetas para exponerlas a la corrosión y seis (6) más para analizar el comportamiento del material sin corroer.

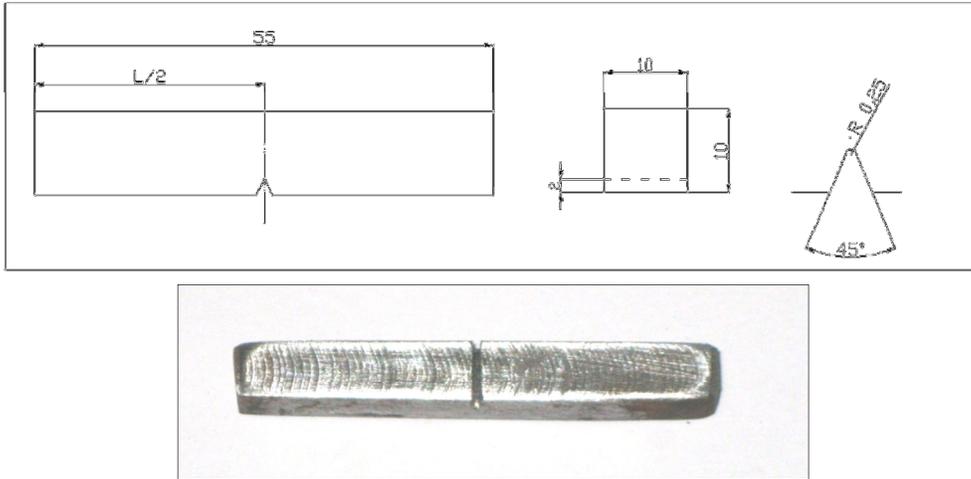


Figura 3.7. Probeta Estándar para Ensayo de Impacto, Tipo A (dimensiones mm)

Fuente: Norma ASTM E 23-02

### 3.7. Procedimiento Experimental

#### 3.7.1. Ensayo de Corrosión

Este ensayo se llevó a cabo por medio de una Cámara de Niebla Salina Estándar, según la norma B117-07a. El equipo utilizado se encuentra en las instalaciones del Laboratorio de Materiales de Carabobo y tiene las características expuestas en la tabla a continuación.

Tabla 3.5. Características de la Cámara de Niebla Salina Estándar.

Marca	The GS equipment
Modelo	08/31 0010
Año de fabricación	1980
Fecha de Calibración	16/04/2009

Fuente: Propia, 2010



Figura 3.8. Cámara de Niebla Salina Estándar

Fuente: Propia, 2010

#### 3.7.1.1. Preparación superficial de la muestra

La superficie de la muestra a ensayar debe ser idéntica a la superficie real que va a ser puesta en uso. Pero esto es idealmente, ya que es casi imposible de lograr. Sin embargo, las muestras a ensayar se debieron preparar previamente, lavando la superficie a ensayar para eliminar óxidos y contaminantes depositados en la misma. Durante la preparación de la muestra se evitó el excesivo calentamiento de ésta.

#### 3.7.1.2. Mediciones y pesajes de las muestras

Después de la preparación superficial de la muestra la pieza fue cuidadosamente medida y pesada. Se hizo necesaria la utilización de una balanza de un alto grado de apreciación (0,1 mg de apreciación). Determinar la pérdida de masa provocada por la corrosión sirvió para crear una idea cuantitativa de la resistencia a la corrosión.

#### 3.7.1.3. Preparación de la solución salina

La solución utilizada en el ensayo de la cámara salina siguió las especificaciones según la norma ASTM, B117-07.

La solución salina se debe preparar disolviendo  $5 \pm 1$  partes por unidad de masa de cloruro de sodio en 95 partes de agua desmineralizada según la especificación ASTM D1193. Se debió prestar especial cuidado al contenido químico de la sal. La sal utilizada fue cloruro de sodio con no más de 0,3 % por unidad de masa del total de impurezas. Así mismo debió estar libre de níquel y cobre. El contenido de este último debió ser de menos de 0,3 ppm por unidad de masa.

El pH de la solución de sal debió estar comprendido en un rango de 6,5 y 7,2. Antes de atomizar la solución, ésta debió estar libre de sólidos suspendidos.

#### 3.7.1.4. Periodos de exposición

Los periodos de exposición de las probetas de acero ASTM A 283, consistieron en tres periodos distintos de exposición, cada uno de 48, 96 y 196 horas respectivamente. Lo anterior está basado en la norma ASTM, B117-07.

Así mismo se garantizó la continuidad de la exposición de las probetas por el periodo de tiempo especificado, haciendo las mínimas interrupciones para cortas inspecciones y retiro de las probetas.

#### 3.7.1.5. Evaluación de la corrosión

La norma ASTM G50-76 especifica que la corrosión se debe evaluar a través de la determinación de la pérdida de peso de cada muestra para así determinar la velocidad de corrosión. Sin embargo este método produce muchas desviaciones cuando la corrosión es altamente localizada y la pérdida de masa es poca (la pérdida de masa puede ser engañosa). En estos casos, otros métodos de evaluación son necesarios.

La norma recomienda ensayos de tracción a las probetas expuestas a la corrosión y luego a probetas del mismo material no sometidas al ensayo de corrosión, y así determinar las variaciones en las propiedades mecánicas. Así

mismo, recomienda la medición de la profundidad de las picaduras presentes en la superficie. Si la superficie presenta muchos agujeros se debe medir el más profundo. También se recomienda determinar la cantidad de huecos por área. Por último, recomienda la realización de estudios metalográficos de las probetas, que son de gran utilidad para determinar otros imperfectos y otros tipos de corrosión localizada.

Por lo anterior se realizaron ensayos de tracción, metalografía, impacto y dureza para las muestras patrón y las muestras sometidas a la cámara salina.

### 3.7.2. Ensayo de Tracción

#### 3.7.2.1 Equipos y materiales utilizados

- Máquina de Ensayos Mecánicos Universal, Marca Galdabini, tipo TC8R-TMS con carga máxima de 200 kN y con dinamómetro N° 33785/3. (Fig. 3.9)
- Sistema computarizado para recolección de data. Ver figura 3.8.



Figura 3.9 Máquina de Ensayos Mecánicos Universal utilizada

Fuente: Propia, 2010

- Mordazas de sujeción para probetas planas

- Compresor de aire. Marcas COMAIR, modelo MK-200, presión máxima 800 KPa.
- Vernier calibre, Marca Mitotuyo, de apreciación  $\pm 0.05\text{mm}$  y rango de 0-300 mm.

### 3.7.2.2 Procedimiento del ensayo

- Marcar y medir la longitud calibrada ( $L_o$ ) en cada probeta
- Medir el ancho inicial ( $W_o$ ) y el espesor inicial ( $T_o$ ) de sección reducida de la probeta, para posteriormente calcular el área transversal inicial ( $A_o$ ) utilizando la ecuación 3.1 (obtenida en la Norma ASTM E8-04)
- Indicar los parámetros del ensayo en del software del equipo.
- Velocidad de ensayo: 4 mm/min. Dentro del rango recomendado por la ASTM E 8M-04.
- Colocar la probeta entre las mordazas del equipo
- Aplicar la carga sobre la probeta hasta la rotura de la misma
- Imprimir la gráfica Fuerza vs. Alargamiento para cada probeta
- Medir la longitud final ( $L_f$ ), espesor final ( $T_f$ ) y el ancho final de la sección reducida ( $W_f$ ).
- Con las mediciones iniciales y finales ( $L_o$ ,  $L_f$ ,  $W_o$ ,  $W_f$ ), determinar el porcentaje de elongación, el área final y el porcentaje de reducción de área, a través de las ecuaciones: 2.10, 2.11 y 2.12 respectivamente.
- Determinar la curva Esfuerzo ingenieril vs Deformación
- Calcular la curva Esfuerzo- Deformación Ingenieril, a partir de la ecuación 2.13.

Una vez obtenida esta gráfica, se determinan los esfuerzos presentados sobre las juntas soldadas. La norma ASTM presenta entre su metodología, el método gráfico para la determinación de estos esfuerzos.

### 3.7.3. Ensayo de Metalografía

#### 3.7.3.1. Equipos y materiales utilizados

- Máquina para embutir, marca Buehler, modelo Simplimet II
- Microscopio Óptico de retina invertida. Marca: Union Modelo: MC 86267 Tokyo Aumentos de 100X, 200X, 400X, 1000X
- Máquina de pulido (fino y grueso) Marca: Buehler Ltd, modelo Ecomet II
- Material de laboratorio (pinzas, algodón, guantes aislante, soporte universal, Beaker)
- Alúmina en suspensión 0.1 micras, marca Buehler, modelo Masterpolish.
- Alúmina en suspensión de 0.05 micras, marca Buehler, modelo Micropolish.
- Reactivo empleado en macroscopia: Solución de Yodo al 10%, en ioduro de potasio al 20%
- Reactivos para ensayo de microscopia: Solución de nital 2%
- Papel abrasivo (lijas) de diferentes numeraciones: 80, 120, 240, 320, 400, 600 y 1200
- Etanol
- Paño de pulido grueso, marca Buehler, modelo Microcloth, color verde.
- Paño de pulido fino, marca Buehler, modelo Microcloth, color marrón.
- Secador para probetas

### 3.7.3.2. Procedimientos del ensayo

1. Se observan las características iniciales de la muestra
2. Se procede a la preparación superficial, se realiza el desbaste grueso y el desbaste fino, según al Norma ASTM E0003-01
3. Cuando la superficie está lista, se realiza el ataque con yodo al 10% en ioduro de potasio al 20%: Se humedece el algodón en la solución y luego se aplica sobre la superficie preparada de la muestra por un periodo de 45 segundos, se enjuaga con agua, aplica etanol y luego hay que dejarlas secar.
4. Observar los cambios que suceden (macroscopia)
5. Se toman las probetas ya analizadas y se sigue el proceso de pulido, que consiste en eliminar las rayas muy finas dejadas en la etapa de desbaste y producir una superficie tipo espejo.
6. Al iniciar el pulido, se debe lavar muy bien la probeta con agua y una solución de jabón
7. Se enciende el disco con el paño Billiard de la pulidora, y se impregna un poco el paño de modo que el abrasivo (alúmina de 0.1 micra) cubra parte del mismo, y se apoya la probeta sobre la superficie del paño aplicando cierta presión por 5 min. Aproximadamente, lo cual depende la de calidad de la superficie al finalizar el pulido. No debe ser mucha la presión porque se puede dañar el paño y deformar la superficie de probeta.
8. Una vez que se finaliza el pulido grueso (paso anterior) se lava la probeta de igual forma que en el paso 7, se enciende el disco que posee el paño Microcloth y se impregna de abrasivo, en este caso alúmina de 0.05 micras. Se coloca la probeta sobre la superficie aplicando cierta presión por 10 min.

9. Finalmente, una vez terminado el pulido, la probeta se vuelve a lavar, y después de eso ya está lista para observar su superficie.
10. Se toma la probeta con la pinza y con la ayuda de un algodón, se humedece la cara pulida de la probeta con el reactivo preparado Nital al 2%; el tiempo de exposición será de 20 segundos para cada probeta.
11. Pasado el tiempo respectivo de aplicación del reactivo, la probeta se lava con abundante agua y se le aplica etanol, para luego ser colocada bajo el secador para probetas, hasta obtener una superficie seca. Se realiza el análisis microscópico de las áreas atacadas.
12. Se obtiene el tamaño de grano de la muestra, utilizando una plantilla con una aumento de 100X.

#### 3.7.4. Ensayo de Impacto

##### 3.7.4.1. Equipos y materiales utilizados

- Probetas metálicas
- Impactómetro, Máquina de ensayo de impacto, Rango 15 kpm, Tipo: 580M, No: 85, Marca: Karl Frank GMBH, Baujahr: 1961.

##### 3.7.4.2. Procedimientos del ensayo

- Se coloca el martillo correspondiente al ensayo Charpy con un peso expresado en 15 kpm. Se levanta el péndulo hasta un tope fijado por el dispositivo, verificando que la escala este en cero.
- Se determinan las pérdidas de energía por fricción con el aire del péndulo, realizando una (1) medición sin muestra alguna en el impactómetro.
- Se coloca el péndulo hacia el tope, se fija la probeta en forma de viga apoyada simplemente en sus extremos en la parte inferior del

dispositivo. Tomando en cuenta el arreglo Charpy debemos ubicarla de modo que la entalladura esté contraria a la cara de impacto.

- Se libera el péndulo desde la parte superior de dispositivo, y una vez que impacta con la probeta, se frena el péndulo por medio de una palanca.
- Se realiza la lectura en la escala semicircular fijada a un lado del dispositivo.
- Se calcula la resistencia al impacto de cada probeta a través de la siguiente ecuación 2.14.
- Observar la fractura.

### 3.7.5. Ensayo de Microdureza

El Ensayo de Microdureza permite realizar mediciones de resistencia a la Deformación de superficies muy pequeñas, como la microdureza del Cordón de soldadura, separada del resto de la estructura.

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

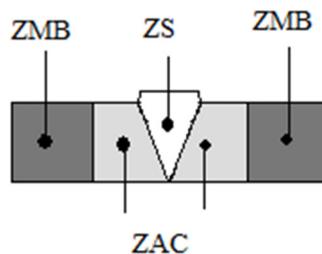


Figura 3.10. Zonas originadas luego del proceso de soldadura

Fuente: Propia, 2010

### 3.7.5.1. Equipos y materiales utilizados

- Probetas metálicas
- Microdurómetro , Marca: Buehler, Modelo Indemet 1104



Figura 3.11. Microdurómetro

Fuente: Propia, 2010

- Indentor.
- Regla graduada, Apreciación  $\pm 0.05\text{mm}$

### 3.7.5.2. Procedimientos del ensayo

1. Encender el Microdurómetro.
2. Luego se procede a colocar la placa a evaluar sobre la prensa.
3. Tomar la referencia base de las líneas de ajuste para medición de diagonales y marcar el origen de la medición.
4. Ajustar la vista de aumento entre 10x o 40x en zona en la cual se tomará la medición.
5. Ubicar la zona donde se realiza la indentación
6. Obtener y registrar las medidas de las diagonales de la huella con ayuda de las líneas de referencia.
7. Registrar el valor de Dureza Vickers (HV)

8. Repetir hasta obtener los valores de microdureza que se requieran
9. Realizar el procedimiento para cada muestra a evaluar.

# CAPÍTULO 4

## *Resultados y Análisis de los Resultados*

---

---

### 4.1 Composición química del metal base

La composición química del metal base fue determinada en la COOPERATIVA DE PRODUCCIÓN INDUSTRIAL DE MOLDES R.L. A continuación se muestran los resultados obtenidos de manera de comparar si el material suministrado cumple con los estándares establecidos en la Norma ASTM A 283.

Tabla 4.1 Resultados obtenidos de la caracterización del metal base

PRODUCTO	CANTIDAD	DUREZA HBN	C	Mn	Si	S	P	Al
<b>Muestra 1 (Laminado en Caliente)</b>	1	220	0,210	0,630	0,270	0,400	0,400	0,21
<b>Muestra 2 (Laminado en Caliente)</b>	1	221	0,200	0,620	0,250	0,400	0,400	0,21

Fuente: COOPERATIVA DE PRODUCCIÓN INDUSTRIAL DE MOLDES R.L.  
Método: Espectrometría de emisión óptica (OES), Certificado N°AM00047

A partir de los resultados obtenidos en la tabla 4.1 se puede determinar que el material adquirido corresponde al material ASTM 283 GR B, ya que su composición coincide con las especificaciones de la norma ASTM A 283/A 283M-03, expuestas en la tabla 2.1 del capítulo 2.

## **4.2 Caracterización del material soldado**

Con el fin de establecer una comparación de las propiedades del material antes y después de ser sometidos a los ensayos de corrosión se determinaron las propiedades del material soldado a partir de los ensayos mecánicos y ensayos metalográficos.

### **4.2.1 Ensayos de Metalografía**

Se escogieron dos (2) muestras para realizar los ensayos de macroscopía y tres (3) para realizar microscopía al material soldado como se explicó con anterioridad en el capítulo 3.

#### **4.2.1.1 Ensayos de Macroscopia**

En la figura 4.1 se pueden observar las probetas una vez atacadas. Se observa en las dos (2) muestras el cordón de la soldadura en forma de V.



(a)

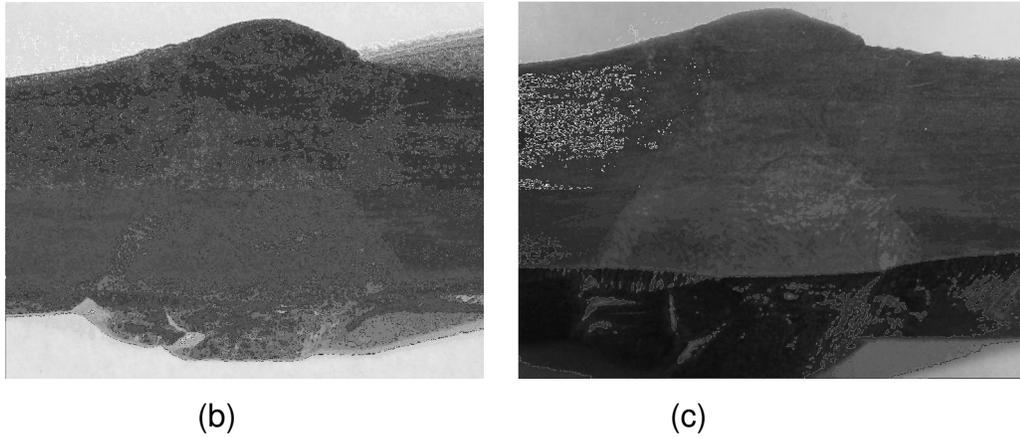


Figura 4.1. Probetas sometidas al ensayo de macroscopía (a) Probeta del ensayo de macroscopía., (b) Cordón de soldadura de la muestra 1 (c) Cordón de Soldadura de la muestra 2

Se puede observar las capas del cordón de soldadura hasta formar la forma en V. Estas surgen del enfriamiento del material durante el proceso de soldadura. Así mismo no se observan grietas en el mismo, lo que permite afirmar que el cordón de soldadura se realizó de manera correcta.

En la figura 4.2 se observa la zona del material base de la probeta. Por medio de la inspección visual se puede determinar que el material no contiene porosidades y grietas superficiales.

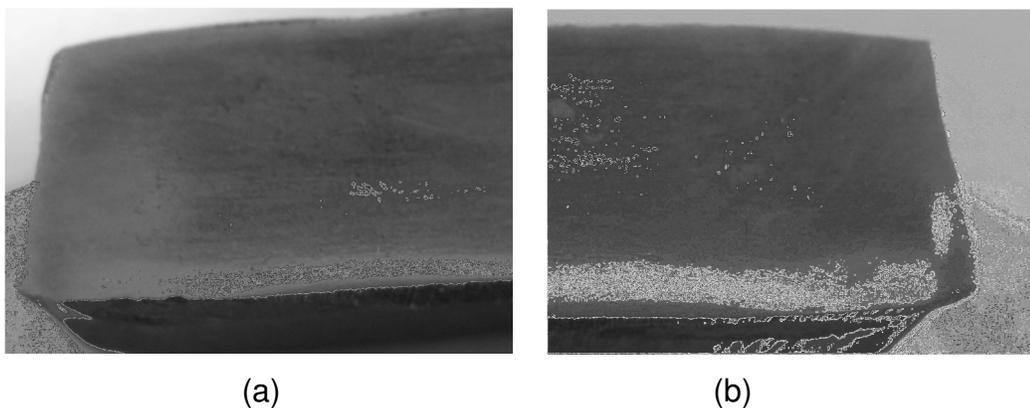


Figura 4.2. Probetas sometidas al ensayo de macroscopía (a) Muestra N°1, (b) Muestra N°2

#### 4.2.1.2 Ensayos de Microscopia.

A continuación se muestra la microestructura de las muestras soldadas ensayadas.

En las figuras 4.3 y 4.4 se muestran la microestructura del metal base, donde se observa la presencia de colonias de perlita en una matriz ferrítica. La perlita está representada por las zonas oscuras mientras que la ferrita se observa en las zonas claras. Esta microestructura es propia de los aceros de bajo carbono, la cual se puede observar en la figura 4.5 mostrada a continuación.

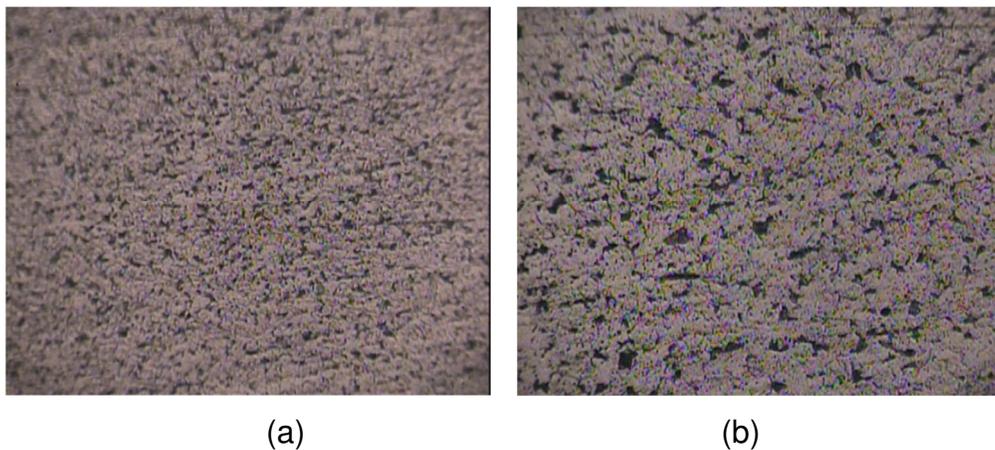


Figura 4.3. Microscopia del metal base (a) Aumento de 100X, (b) Aumento de 200X

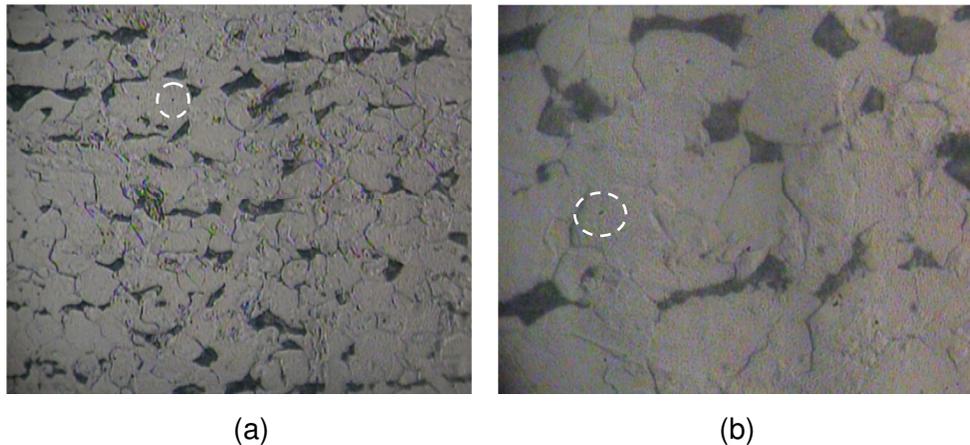


Figura 4.4. Microscopia del metal base (a) Aumento de 400X, (b) Aumento de 1000X

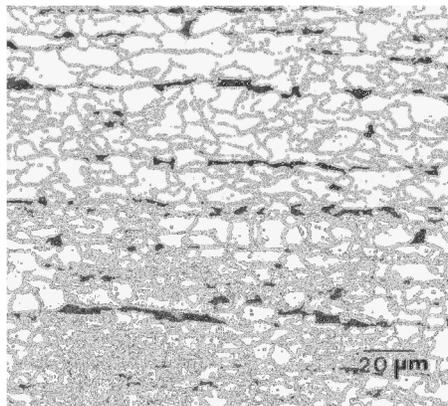


Figura 4.5. Microestructura ferrita y perlita (oscura) equiaxial (poligonal) en un acero de bajo carbono a 500X

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

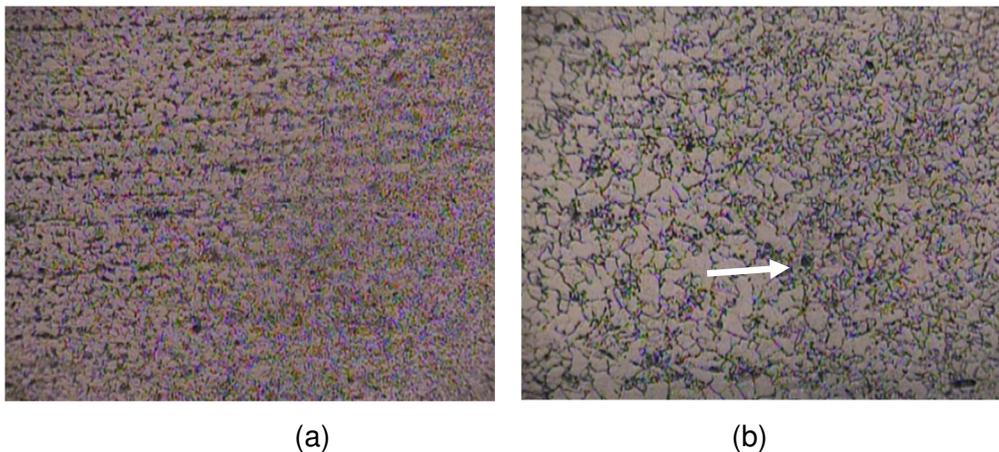


Figura 4.6. Microscopía de la interfase Metal Base-Zona Afectada Térmicamente (a) Aumento de 100X, (b) Aumento de 200X

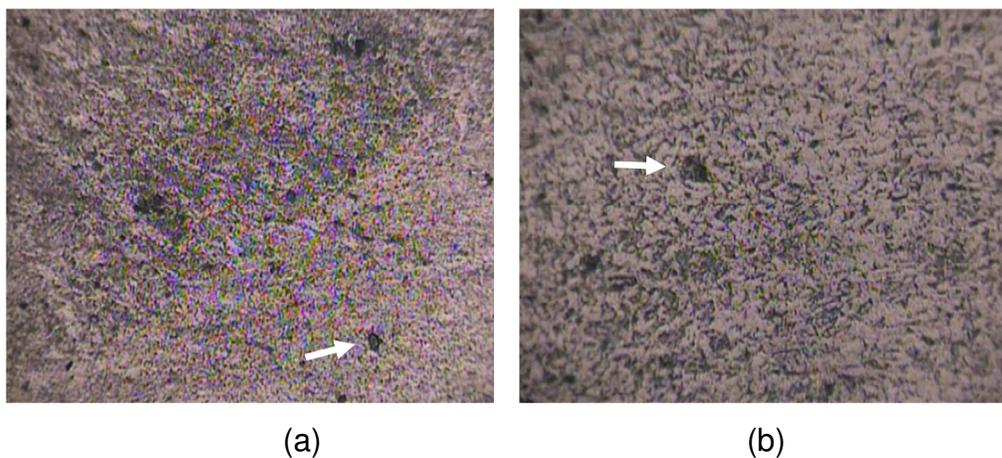


Figura 4.7. Microscopía de la interfase Zona Afectada Térmicamente-Cordón de Soldadura (a) Aumento de 100X, (b) Aumento de 200X

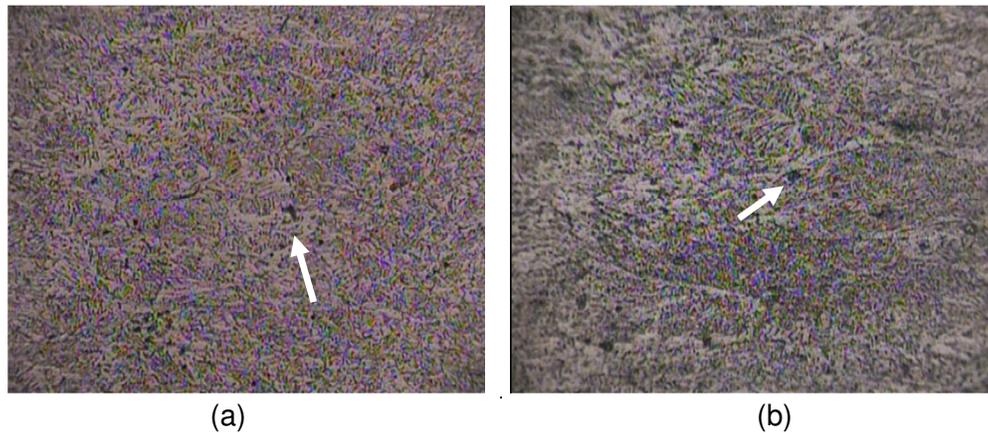


Figura 4.8. Microscopia del Cordón de Soldadura (a) Aumento de 100X, (b) Aumento de 200X

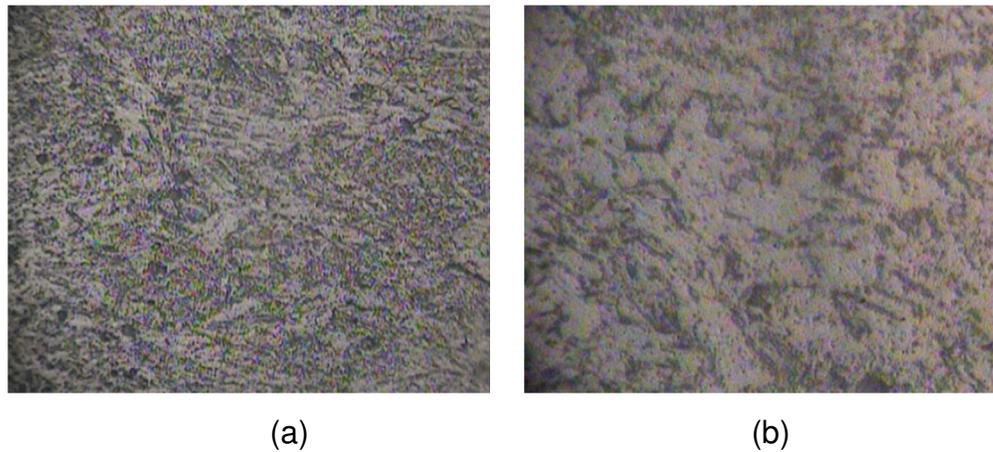


Figura 4.9. Microscopia del Cordón de Soldadura (a) Aumento de 400X, (b) Aumento de 1000X

En la figura 4.4 se observan los granos orientados de manera horizontal, granos de perlita alargados, como consecuencia de la laminación en caliente. Por otro lado es importante resaltar la presencia de carburos sobre la matriz ferrítica y una gran cantidad de inclusiones no metálicas, las cuales se pueden observar con mayor detenimiento en las figuras 4.7 y 4.8.

En las figuras 4.8 y 4.9, se presenta la microestructura del cordón de soldadura, donde a diferencia del metal base, se observa perlita disgregada, se presenta en forma de estrella en una matriz ferrítica. Esta estructura es conocida como estructura de Widmanstätten, que resulta cuando los aceros son enfriados a

una tasa crítica (enfriamiento muy lento durante un espacio prolongado de tiempo) desde temperaturas muy elevadas. Consiste en ferrita y perlita y tiene una apariencia rayada como consecuencia de la formación de ferrita a lo largo de ciertos planos cristalográficos.

Medición del tamaño de grano.

A través de la utilización de una plantilla patrón y un microscopio se midió el tamaño de grano de las muestras sometidas al ensayo de microscopia, a un aumento de 100X. Los resultados se muestran en la tabla 4.3.

Tabla 4.3 Tamaño de grano para las muestras soldadas

Zona	Número de Tamaño de Grano	
	Ferrita	Perlita
Zona del Metal Base	7	7
Zona afectada por el Calor	8	8
Zona de Soldadura	8	8

Al observar las figuras 4.6 y 4.7, zona de transición del metal base a la zona afectada térmicamente por el calor y de la misma al cordón de soldadura, se observa como el tamaño y forma del grano va cambiando progresivamente, de granos más grandes a granos de menor tamaño.

Al comparar la microestructura de la zona soldada con la del material base, figuras 4.4 y 4.9, se observa, para la zona soldada granos pequeños y alargados, mientras que para la zona del metal base se presentan granos de mayor tamaño. Esto se comprueba con el tamaño de grano obtenido (Tabla 4.3), donde la zona del metal base presenta un número de grano menor que el resto de las zonas.

Este cambio de la forma de tamaño de grano en la zona afectada por el calor y el cordón de soldadura, son consecuencia del calentamiento del metal a altas temperaturas durante el proceso de soldadura.

#### 4.2.2 Ensayos de Tracción

Se realizaron ensayos de tracción a cuatro (4) probetas de acero ASTM 283 GR B, como se explicó en el capítulo 3. Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

En la figura 4.10 se observan las probetas de tracción una vez ensayadas. Es importante destacar que ninguna de las probetas fracturo en la zona soldada. Así mismo en la figura 4.11 se observa el tipo de fractura obtenida, la cual fue de tipo copa-cono.

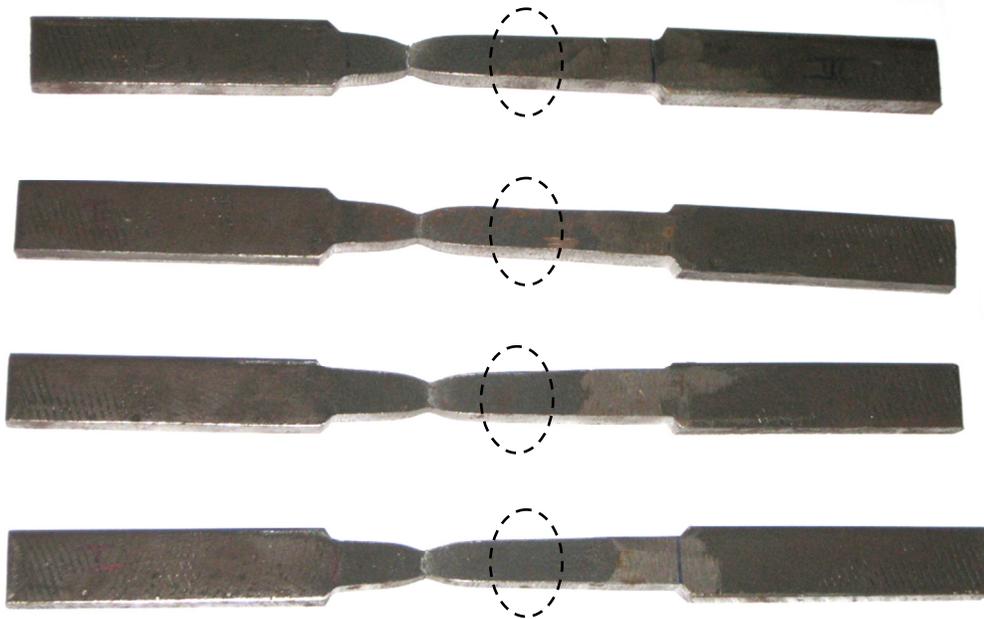


Figura 4.10. Probetas de tracción ensayadas durante la caracterización del metal soldado.



Figura 4.11. Tipo de fractura para las probetas de tracción ensayadas durante la caracterización del metal soldado.

A continuación, a partir de los valores carga-desplazamiento se obtuvieron las gráficas esfuerzo deformación ingenieril.

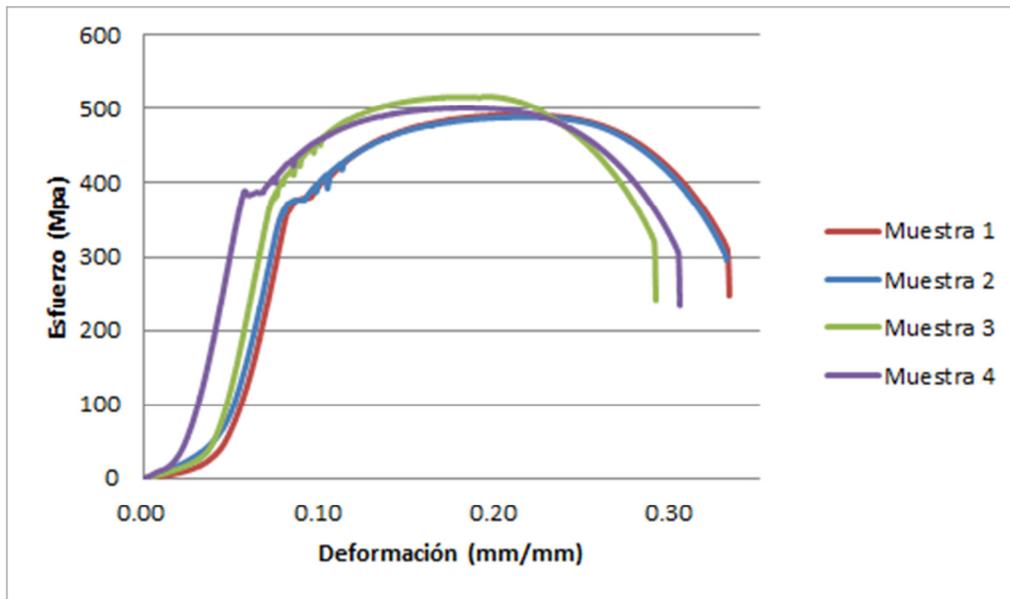


Figura 4.12 Comparación de las gráficas de los ensayos de tracción de las probetas soldadas

A partir de las gráficas esfuerzo –deformación ingenieril se determinaron las propiedades mecánicas del material, para ello se realizó el procedimiento expuesto en el capítulo 3. Los resultados se muestran en la tabla 4.4 expuesta a continuación.

Tabla 4.4 Propiedades mecánicas de las probetas soldadas

Propiedades Mecánicas	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Promedio	Desviación Estándar
<b>Esfuerzo de Fluencia (Y) [Mpa]</b>	387,83	388,74	388,12	388	388,03	0,39
<b>%RA</b>	78,57	56,25	78,57	78,57	72,99	11,16
<b>%E (70 mm)</b>	9,58	8,75	7,92	7,92	8,54	0,79
<b>Esfuerzo Máximo [Mpa]</b>	491,32	488,38	517,01	501,05	499,44	11,18
<b>Esfuerzo de Rotura [Mpa]</b>	320,01	301,57	312,72	310,45	311,19	7,60

Al realizar la comparación de las propiedades mecánicas obtenidas durante los ensayos de tracción del material soldado con las propiedades reflejadas en la

norma ASTM A 283 (Véase tabla 2.2), se obtiene que las diferencias más significativas son las siguientes:

- Las muestras presentan valores de esfuerzo máximo y de esfuerzo a la fluencia, mayores que los establecidos en la Norma ASTM A 283.
- Por otra parte el porcentaje de elongación de las muestras es menor al expuesto en la Norma ASTM A 283

Lo anterior se debe a que durante el proceso de soldadura, los ciclos térmicos producidos por la fuente de calor en movimiento causan cambios físicos, transformación metalúrgica, estrés térmico transitorio y movimiento del metal, lo que conlleva a que se generen mayores esfuerzos que los que soportan el material para que ocurra la fractura.

#### 4.2.3 Ensayos de Dureza

A continuación se muestran los resultados de dureza Vickers realizado a tres (3) muestras soldadas. Donde se tiene que ZS es la zona de la soldadura, ZAC es la zona afectada por el calor y ZMB es la zona del metal base.

Tabla 4.5 Resultado de las pruebas de dureza de la muestra soldada N°1

Muestra N°1					
Zona	D1	D2	HV	Promedio	Desviación Estándar
ZS	19.9	19.9	234.1	237.23	12.98
ZS	19.4	21.1	226.1		
ZS	19.2	19.2	251.5		
ZAC	21.3	21.3	206.3	206.33	3.85
ZAC	21.4	21.4	202.5		
ZAC	21.5	20.5	210.2		
ZMB	23.7	22.2	176	183.93	22.47
ZMB	23.2	24.0	166.5		
ZMB	20.0	22.1	209.3		

Tabla 4.6 Resultado de las pruebas de dureza de la muestra soldada N°2

Muestra N°2					
Zona	D1	D2	HV	Promedio	Desviación Estándar
ZS	20	17,5	263,7	263,7	0
ZS	18,5	19	263,7		
ZS	18,9	18,6	263,7		
ZAC	19,8	19,9	235,3	221,73	13,03
ZAC	20,4	20,6	220,6		
ZAC	20,7	21,4	209,3		
ZMB	20,2	20	229,5	213,46	22,22
ZMB	19,5	21,3	222,8		
ZMB	22,7	21,7	188,1		

Tabla 4.7 Resultado de las pruebas de dureza de la muestra soldada N°3

Muestra N°3					
Zona	D1	D2	HV	Promedio	Desviación Estándar
ZS	19,5	19,8	240,1	236.93	5.48
ZS	20,5	19,6	230,6		
ZS	19,9	19,4	240,1		
ZAC	20,9	20,2	219,6	207.56	11.075
ZAC	21,1	22,5	197,8		
ZAC	21,6	20,9	205,3		
ZMB	19,4	20,9	228,4	207.4	20.95
ZMB	21,8	22,8	186,5		
ZMB	21,8	20,5	207,3		

En la figura 4.13 se puede observar que la dureza de la zona soldada es mayor que la dureza de la zona afectada por el calor y el metal base.

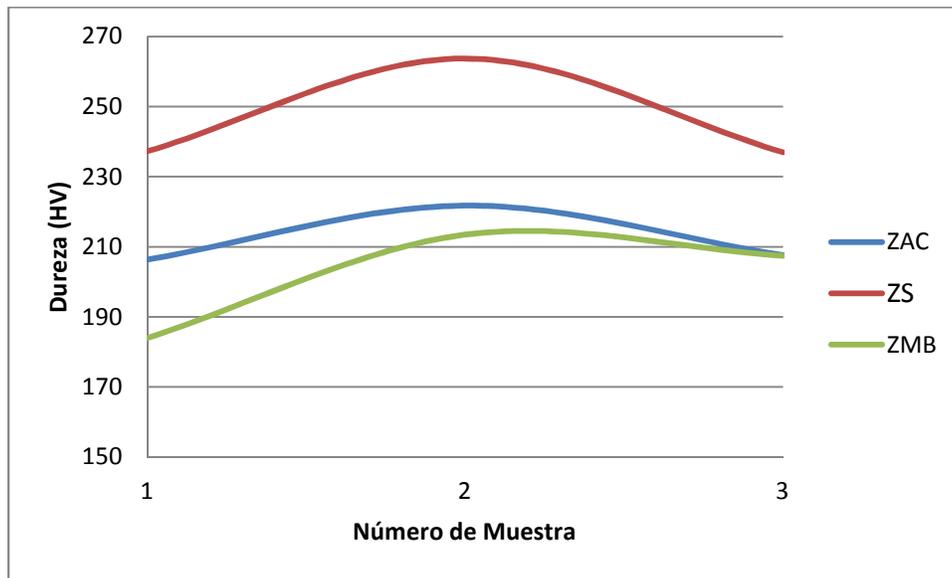


Figura 4.13 Valores de dureza de las tres (3) probetas soldadas ensayadas.

Tabla 4.8 Resultado de las pruebas de dureza de las muestras soldadas

Zona de análisis (Muestra patón)	ZS	ZAC	ZMB
<b>Muestra 1</b>	237.23	206.33	183.93
<b>Muestra 2</b>	263.7	221	214
<b>Muestra 3</b>	237	208	207.4
<b>Promedio</b>	246	211.74	201.78
<b>Desviación Estándar</b>	15.37	8.33	12.90

Al estudiar los valores promedios de dureza de las muestras ensayadas se observa que la zona soldada presenta el valor de dureza más elevado, para luego disminuir en la zona afectada por el calor y por último en la zona del metal base, así lo muestra la tendencia de la figura 4.14.

La figura 4.14 refleja que el valor de dureza de la zona soldada es mayor en un 21,91 % que la del metal base. Esto se debe a la estructura conformada por perlita fina disgregada, detrítica, que forma la perlita en la zona soldada, como se observó en los ensayos de microscopía. Así mismo la gran cantidad de carburos presentes en la matriz ferrítica, proporciona una mayor dureza a la zona.

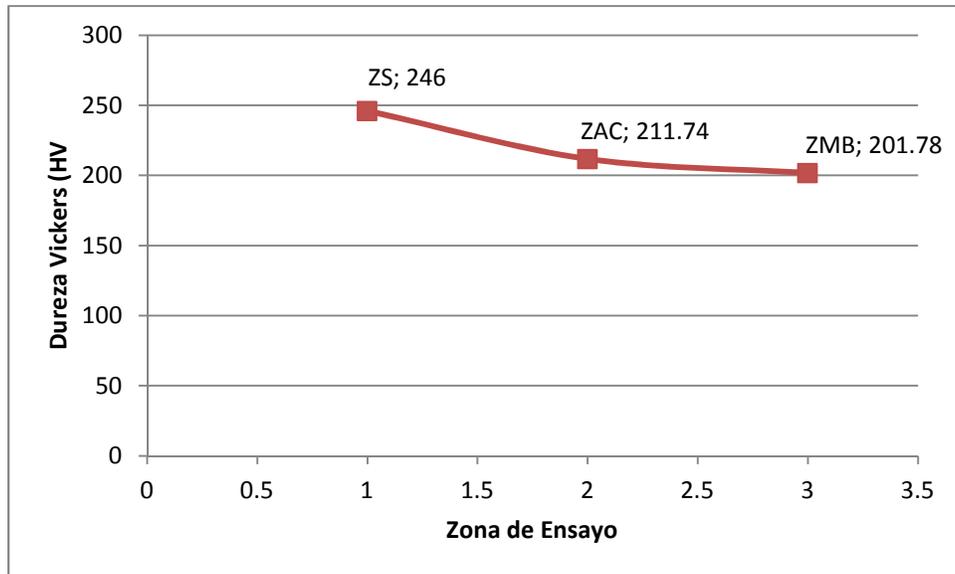


Figura 4.14 Valores promedio de dureza de las zonas ensayadas

El propósito principal de este ensayo es verificar la presencia de martensita en la zona afectada por el calor. La martensita es una estructura no deseada en la soldadura. En este caso ninguno de los valores de dureza, en esta zona, excede 240 HV, el nivel de dureza asociado con la presencia de martensita, lo que coincide con la estructura observada durante los ensayos de microscopía.

Los valores de dureza de la zona afectada por el calor y la zona del metal base son bastante similares, presentando una tendencia casi lineal en la gráfica. Este comportamiento es deseado durante el proceso de soldadura. Esto se debe a que el calor generado durante el proceso de soldadura afectó poco a la zona afectada por el calor, teniendo una diferencia de solo 4,8% respecto al material base. Hubo un enfriamiento bastante uniforme.

Los valores de dureza obtenidos permiten afirmar que el proceso de soldadura se elaboró de manera correcta.

Por otro lado es importante resaltar que el material contiene un bajo nivel de carbono, un elemento que tiene un papel de gran importancia en la dureza general de los aceros, por lo que se asocia a los bajos niveles de dureza en general.

#### 4.2.4 Ensayos de Impacto

A continuación se muestran los resultados de la energía absorbida en el Ensayo de Impacto (Péndulo de 15 kpm) para las muestras soldadas de 10x10mm.

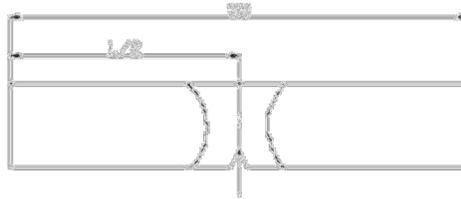


Figura 4.15 Vista transversal de la probeta para el ensayo de Charpy

Al realizar el ensayo de impacto se obtuvo que todas las probetas fracturaron en la zona soldada, donde se encontraba la muesca. En las figuras 4.16 y 4.17, a través de la inspección visual de las superficies fracturadas, se observa que la fractura es de tipo dúctil. El factor que se aprecia de forma inmediata y a simple vista es el hecho que no se produce, para ninguno de los ensayos, un cambio en el tipo de fractura del material. Es importante recalcar que en ninguna de las muestras se observó con fractura completa del material.



Figura 4.16 Probetas ensayadas del ensayo de Charpy para la caracterización del metal soldado.



Figura 4.17 Fractura de las probetas ensayadas del ensayo de Charpy para la caracterización del metal soldado.

En la tabla 4.9 se presentan los valores de tenacidad obtenidos para el ensayo, los cuales presentan poca dispersión. Es importante resaltar que los valores de tenacidad se ven influenciados por la presencia de ferrita en la zona soldada del material, ya que altos porcentajes afectan la tenacidad.

Tabla 4.9 Resultados obtenidos para el ensayo de impacto de las muestras soldadas.

Probeta	1	2	3	4	5	6	Promedio	Des. Estándar	
Angulo	78°	80°	82°	85°	64°	80°	78,16°	2,40	
Tenacidad	Kpm	9	8,8	9,1	8,1	10,8	8,8	9,10	0,9
	J	88,29	86,32	89,27	79,46	105,94	86,32	89,26	8,86

### 4.3 Ensayos de Corrosión

Las probetas para el ensayo de Corrosión fueron previamente pesadas e identificadas antes de ser introducidas a la Cámara de Corrosión como se observa en la figura 4.18

Las probetas se ubicaron dentro de la cámara de Corrosión (Cámara de niebla salina estándar) de la Sala de Corrosión del Laboratorio de Materiales de la Universidad de Carabobo.

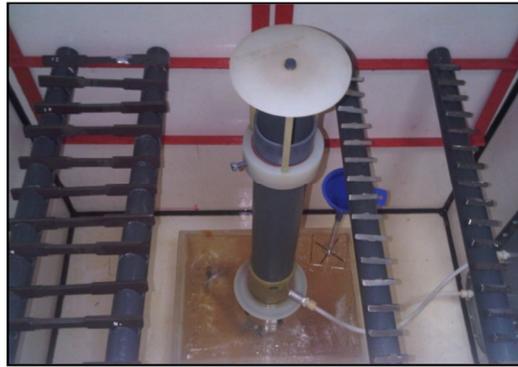


Figura 4.18. Disposición de las probetas en la Cámara de Corrosión, de la Sala de Corrosión de la Universidad de Carabobo

Fuente: Propia

La apariencia de las probetas después de realizado el ensayo de corrosión, de acuerdo a cada periodo de exposición, se observan en la tabla 4.10, a continuación expuesta.

Tabla 4.10 Resultados de Ensayo de corrosión en los tres (3) periodos de exposición

Periodo de Exposición 48hr	Periodo de Exposición 96hr	Periodo de Exposición 196hr
		

Comparando las probetas expuestas a la cámara de corrosión con las muestras iniciales, se puede apreciar un deterioro superficial debido a la atmósfera a la cual se encontraban expuestas, y esto se acentúa a medida que el periodo de exposición fue mayor. Se pudo observar que la superficie más afectada en los tres (3) casos fue la que se mantuvo en contacto directo con la atmósfera salina. A

medida que aumentaban los periodos de exposición, mayor era la capa de productos de la corrosión formada.

#### 4.3.1 Pérdida de Peso en Probetas de Tracción

La pérdida de peso promedio de las probetas expuestas a la atmósfera corrosiva, según el periodo de exposición se pueden observar en la tabla 4.11. Donde a medida que el tiempo de exposición a la cámara fue mayor, la pérdida de peso también aumentó. Esto se debe a que el deterioro del material producido por el ataque químico del ambiente salino aumenta a medida que la exposición al mismo se incrementa.

Tabla 4.11 Pérdida de peso en las Probeta de tracción

Periodo de Exposición	Promedio de Pérdida de peso (g)
Periodo de 48hr	0,25
Periodo de 96hr	0,50
Periodo de 196hr	1,00

#### 4.3.2 Pérdida de Peso en Probetas de Metalografía/Dureza e Impacto.

Las muestras para los ensayo de metalografía, dureza e impacto presentaron una pérdida de peso muy pequeña ( $\mu\text{g}$ ) en los periodos de exposición de 48 hr. y 96 hr, los cuales se despreciaran en comparación a lo obtenido en el periodo de exposición de 196 hr, expuestos en la tabla 4.12.

Tabla 4.12 Pérdida de peso en las Probeta de metalografía/dureza e Impacto

Periodo de Exposición de 196 hr	Promedio de Pérdida de peso (g)
Muestras metalografía/dureza	0,40
Muestras de Impacto	0,60

Un factor que limita la utilidad de los datos anteriores, es la no linealidad general de pérdida de peso debido a la corrosión con el tiempo.

## 4.4 Ensayos de Metalografía

### 4.4.1 Probetas sometidas por un periodo de 48 hr

#### 4.4.1.1 Macroscopía.

En las figuras 4.11 y 4.12 se muestran los resultados obtenidos para el ensayo de macroscopía. Para este ensayo se le aplicó a las probetas desbaste grueso y fino, para posteriormente ser atacadas.

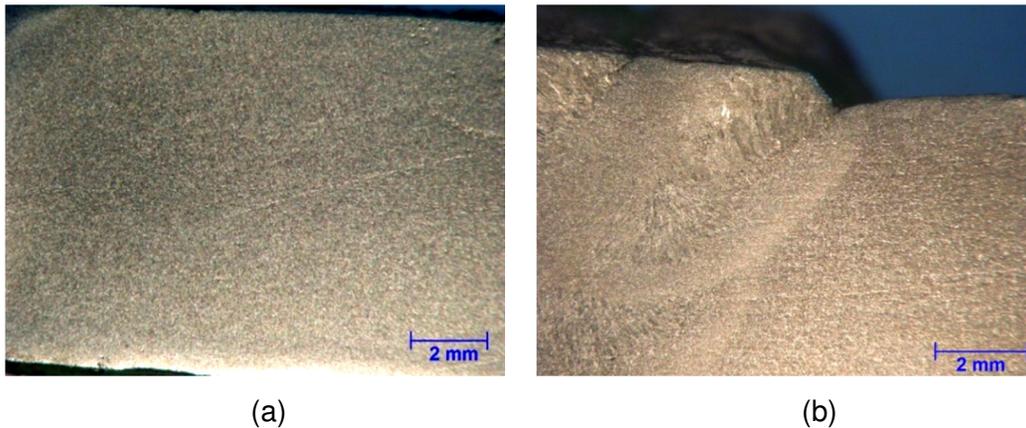


Figura 4.11. Macroscopía (a) Metal Base, (b) Metal base-ZAT-Cordón de Soldadura

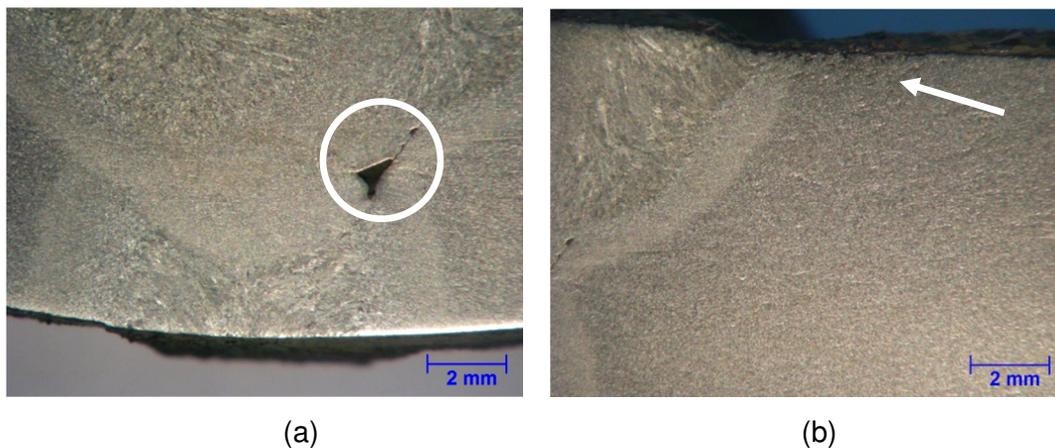


Figura 4.12. Macroscopía (a) Cordón de Soldadura y Defecto, (b) Metal base-ZAT-Cordón de Soldadura

Se puede observar a primera instancia que el cambio más significativo fue el deterioro de metal exteriormente. Una vez desbastada las probetas solo se visualizan pequeños cambios.

En la figura 4.12 (b) se observa la presencia de zonas de corrosión localizada en los límites de la superficie de la probeta. Este comportamiento es más acentuado a lo largo del cordón de soldadura y de la zona afectada por el calor. En este tipo de corrosión los productos generados por corrosión se precipitan formando películas en la superficie del metal.

#### 4.7.1.2 Microscopia.

En las figuras 4.13 y 4.14 se observa la microestructura del metal base para las probetas sometidas a la cámara salina durante un periodo de 48 hr. Se observa la presencia de colonias de perlita en una matriz ferrítica, al igual que la microestructura presentada en el metal base para la caracterización del metal soldado, propia de un acero de bajo carbono.

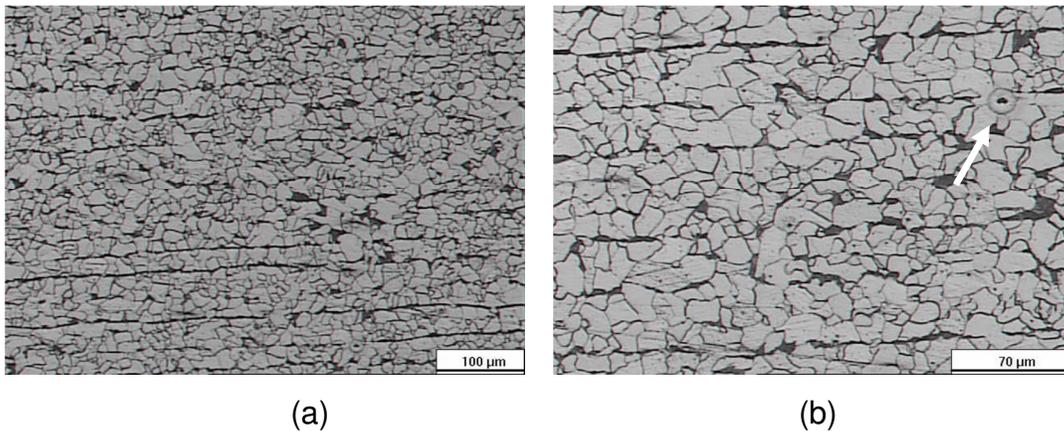


Figura 4.13. Microscopia del Metal Base (a) Aumento de 100X, (b) Aumento de 200X

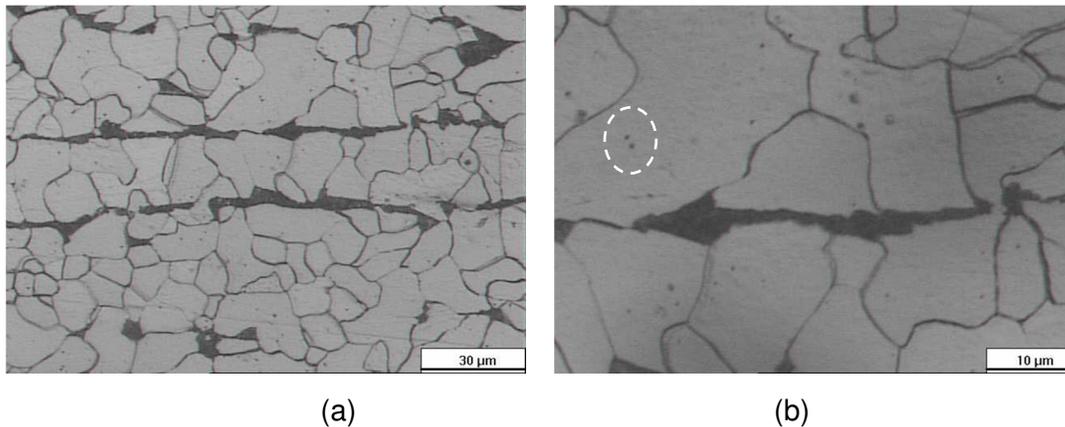


Figura 4.14. Microscopia del Metal Base (a) Aumento de 400X, (b) Aumento de 1000X

Se observa la orientación de los granos de forma horizontal y granos de perlita alargados, estructura característica del proceso de laminación en caliente.

Por otro lado se observan inclusiones metálicas, así como también una gran cantidad de carburos sobre la matriz ferrítica, evidenciados en la figura 4.14 (b).

En las figuras 4.15 y 4.16 se observa, del mismo modo, la presencia de perlita y ferrita. Sin embargo por tratarse de la zona de transición del metal base a la zona afectada terminalmente por el calor, se observa como el tamaño de grano se va reduciendo. La perlita empieza a cambiar su estructura a una forma estrellada. En la figura 4.16 (b) se observa perlita disgregada sobre la matriz ferrítica.

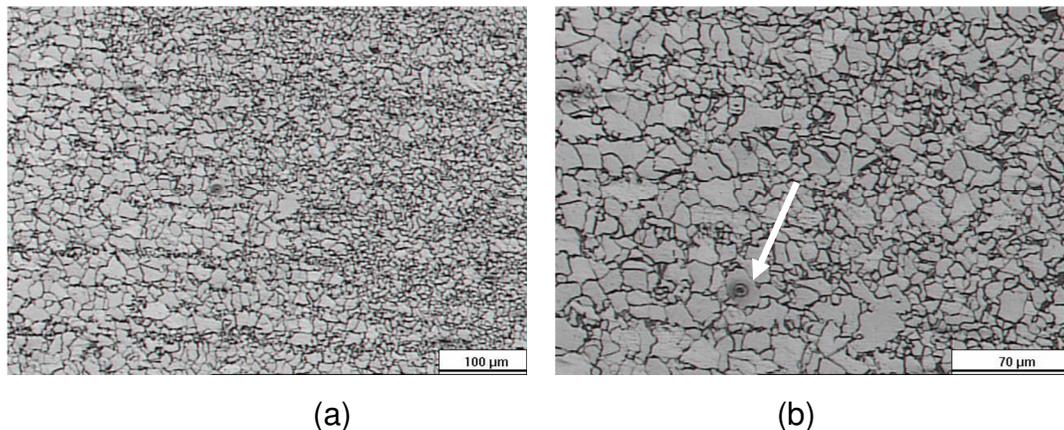


Figura 4.15. Microscopia de la interfase Metal Base-Zona Afectada Térmicamente (a) Aumento de 100X, (b) Aumento de 200X

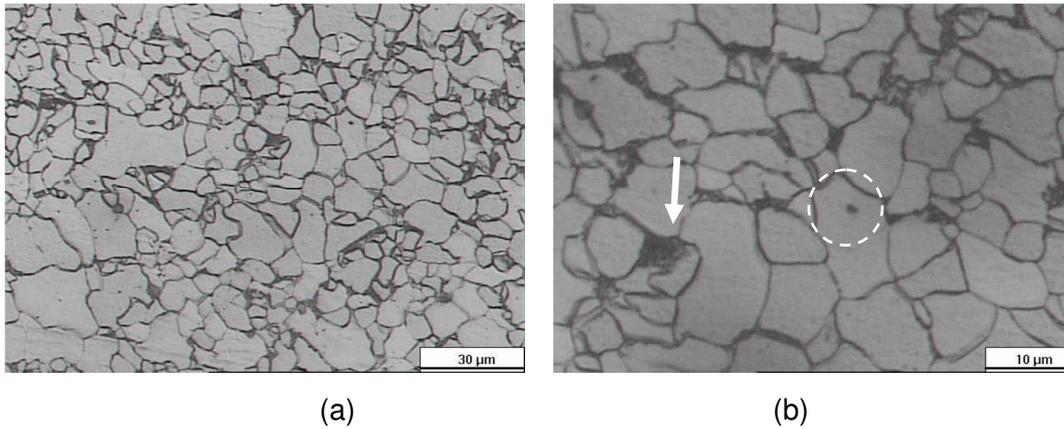


Figura 4.16. Microscopia de la interfase Metal Base-Zona Afectada Térmicamente  
 (a) Aumento de 400X, (b) Aumento de 1000X

En las figuras 4.17 y 4.18 se observa la perlita disgregada sobre la matriz ferrítica, la forma estrellada de la perlita se hace más evidente. Así mismo los granos se presentan mucho más alargados y de menor tamaño.

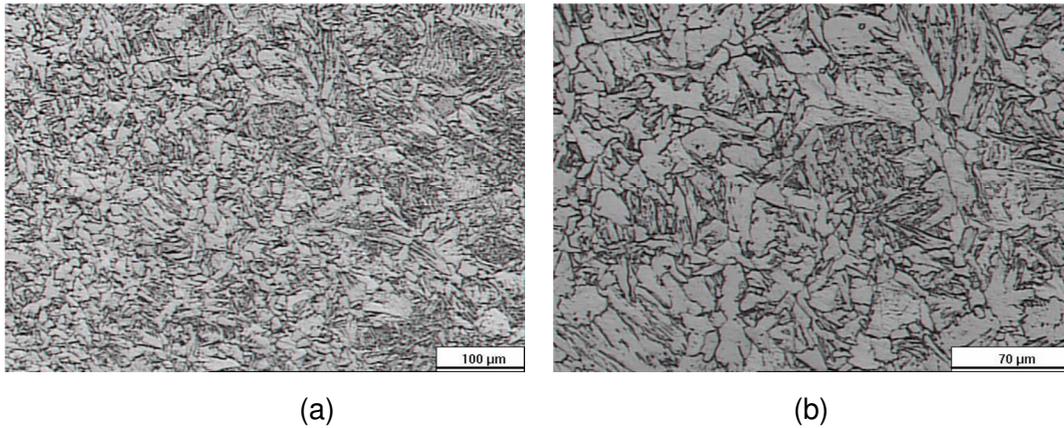


Figura 4.17. Microscopia de la Zona Afectada Térmicamente (a) Aumento de 100X, (b) Aumento de 200X

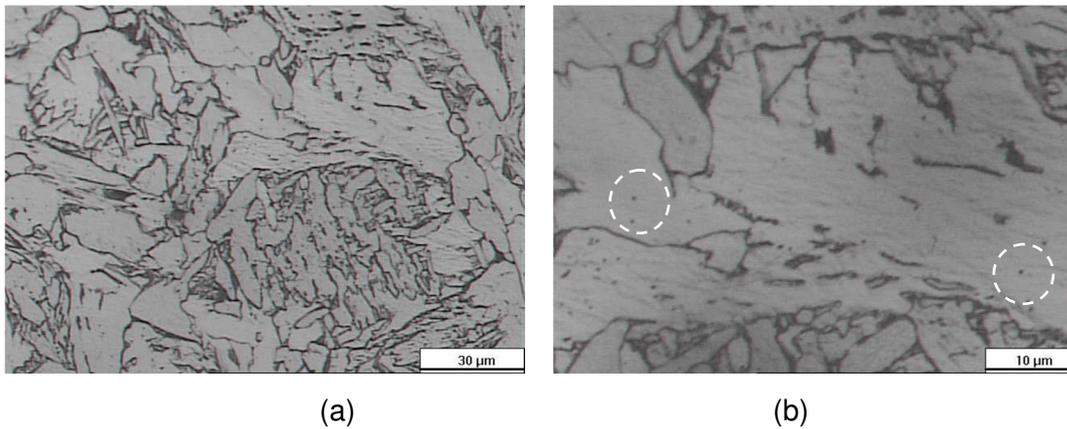


Figura 4.18. Microscopia de la Zona Afectada Térmicamente (a) Aumento de 400X, (b) Aumento de 1000X

En las figuras 4.19 y 4.20 se observa la zona de transición a la de la zona afecta por el calor al cordón de soldadura, donde el tamaño de grano se vuelve a reducir. Se observa una gran cantidad de carburos

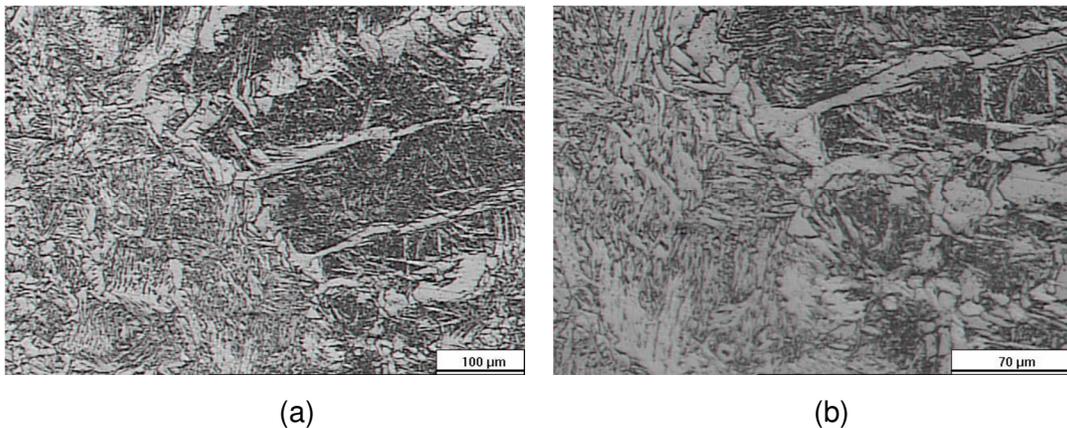


Figura 4.19 Microscopia de la interfase Zona Afectada Térmicamente-Cordón de Soldadura (a) Aumento de 100X, (b) Aumento de 200X

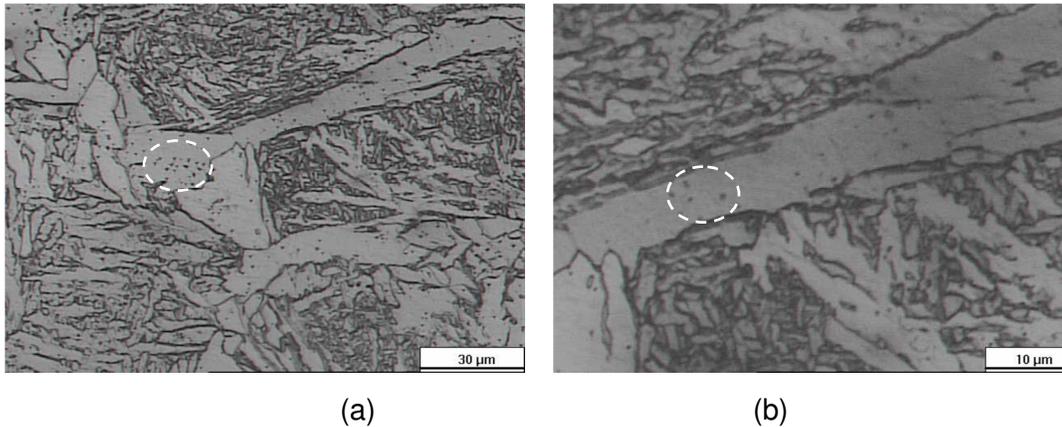


Figura 4.20. Microscopia de la interfase Zona Afectada Térmicamente-Cordón de Soldadura (a) Aumento de 400X, (b) Aumento de 1000X

En las figuras 4.21 y 4.22 se observa perlita y ferrita, formando la estructura Widmanstätten, al igual que se observó para la microestructura de la zona soldada del material del soldado. La perlita se encuentra en forma estrellada, disgregada sobre la matriz ferrítica. La presencia de una gran cantidad carburos se hace evidente.

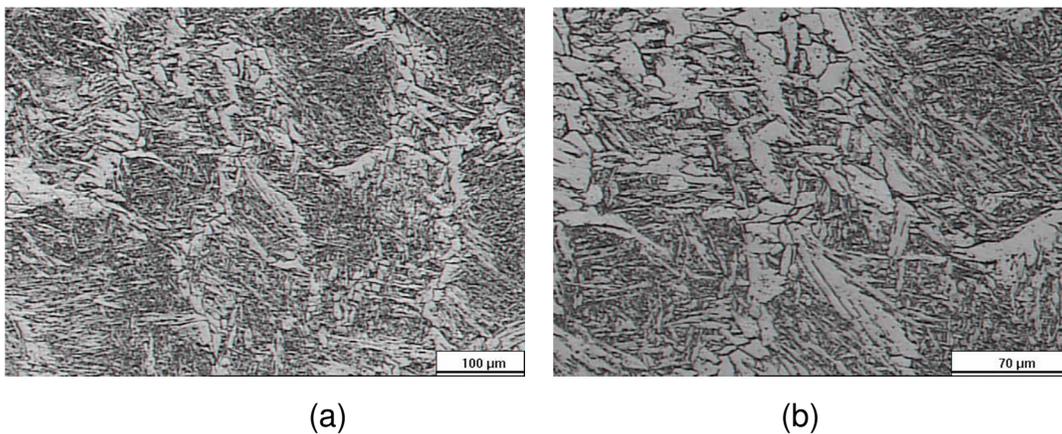


Figura 4.21. Microscopia del Cordón de Soldadura de la muestra b51 (a) Aumento de 100X, (b) Aumento de 200X

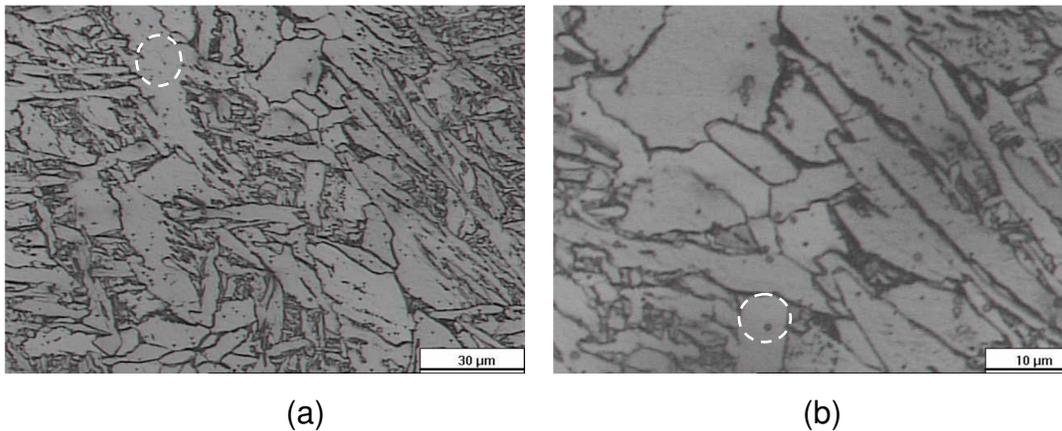


Figura 4.22. Microscopía del Cordón de Soldadura de la muestra b51 (a) Aumento de 400X, (b) Aumento de 1000X

Al comparar las figuras anteriores con la microscopía realizada en la caracterización del metal soldado, no se observan cambios significativos. Esto puede deberse a que los efectos de la corrosión no fueron acentuados a nivel microestructural.

#### Medición del tamaño de grano.

Los resultados obtenidos para el tamaño de grano de las muestras sometidas a la cámara salina por un periodo de 48 hr. se muestran en la tabla 4.13.

Tabla 4.13 Tamaño de grano para las muestras sometidas a la cámara salina por un periodo de exposición 48hr.

Zona	Número de Tamaño de Grano	
	Ferrita	Perlita
Zona metal base	7	7
Zona afectada por calor	8	8
Zona Soldada	8	8

Se observa que el tamaño de grano de las muestras sometidas a la cámara salina por un periodo de 48hr, no presentan variación alguna con respecto a las muestras soldadas.

#### 4.4.2 Probetas sometidas por un periodo de 96 hr.

##### 4.4.2.1 Macroscopía.

A continuación se muestran en las figuras 4.23 y 4.24 los resultados obtenidos para el ensayo de macroscopía para las muestras expuestas por un periodo de 96hr. Al igual que el caso anterior, se le aplicó a las probetas desbaste grueso y fino, para posteriormente ser atacadas.

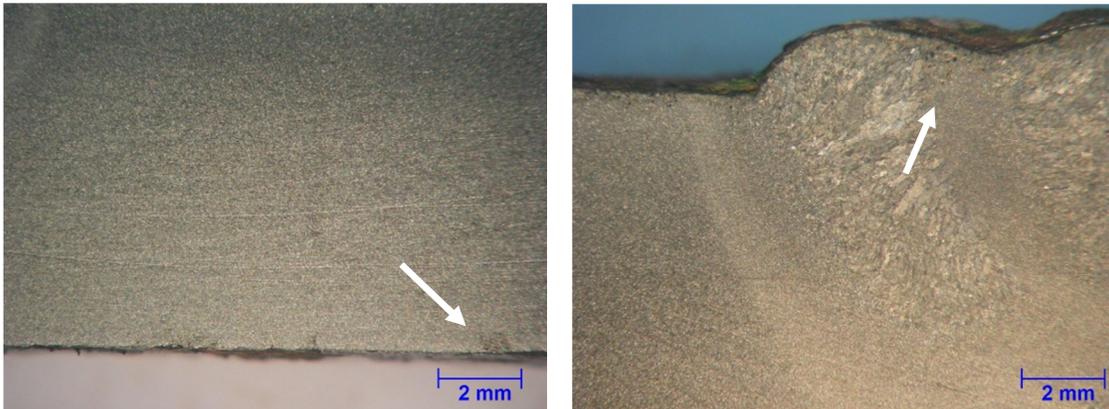


Figura 4.23 (a) Metal Base, (b) Metal base-ZAT-Cordón de Soldadura

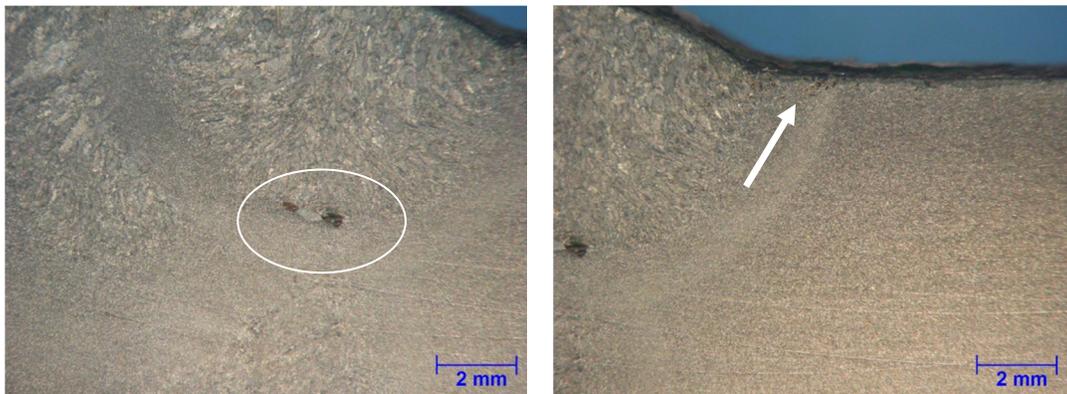


Figura 4.24. (a) Cordón de Soldadura y Defecto, (b) Metal base-ZAT-Cordón de Soldadura

Se observa corrosión generalizada sobre toda la superficie en contacto directo con el ambiente corrosivo.

Para un periodo de 96hr, los efectos de la corrosión se evidenciaron principalmente en la superficie de la probeta. Se observan puntos de corrosión localizada en la superficie del cordón de soldadura y en algunas zonas de la zona del metal base.

No se observan cambios significativos en comparación al periodo anterior.

Por último es importante resaltar que las porosidades internas del material no se vieron afectadas por la corrosión, ya que se encontraban en un nivel menos superficial, y no tuvieron contacto con la atmosfera salina.

#### 4.4.2.2. Microscopia.

En las figuras 4.25 y 4.26 se puede observar la microestructura del metal base para un periodo de exposición de 96hr. Al igual que el periodo anterior se observan colonias de perlita en una matriz ferrítica. Así mismo se observan inclusiones no metálicas en el material y carburos en la matriz ferrítica.

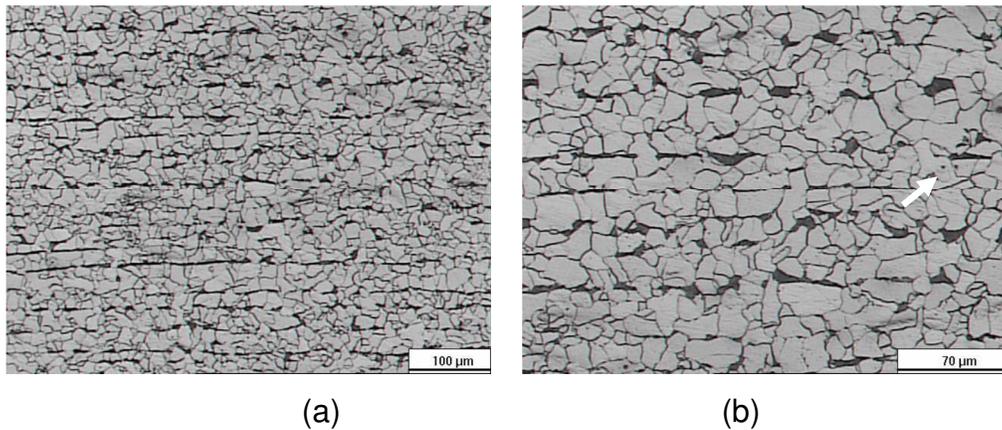


Figura 4.25. Microscopia del Metal Base (a) Aumento de 100X, (b) Aumento de 200X

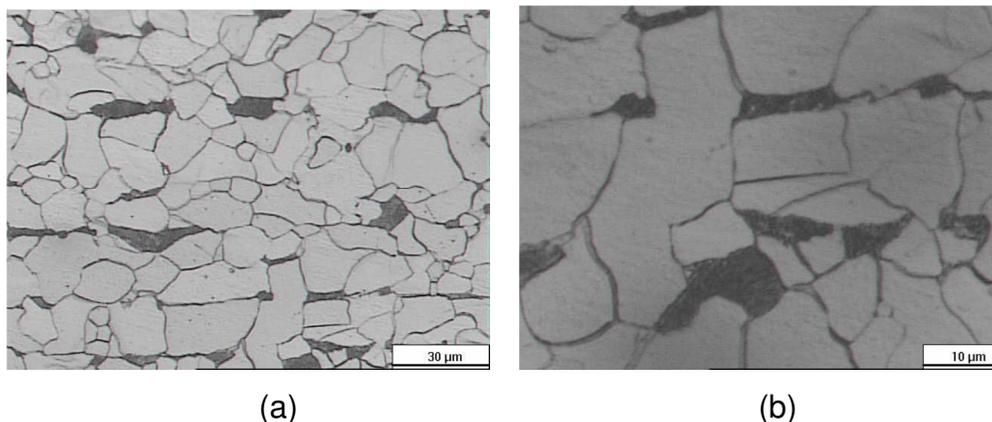


Figura 4.26. Microscopia del Metal Base (a) Aumento de 400X, (b) Aumento de 1000X

En las figuras 4.27 y 4.28 se observa la transición del metal base a la zona afectada por el calor, donde el tamaño de grano se reduce. En la figura 4.28 (b) se observa perlita disgregada. La perlita va cambiando su estructura a una forma estrellada a medida que se acerca al cordón de soldadura.

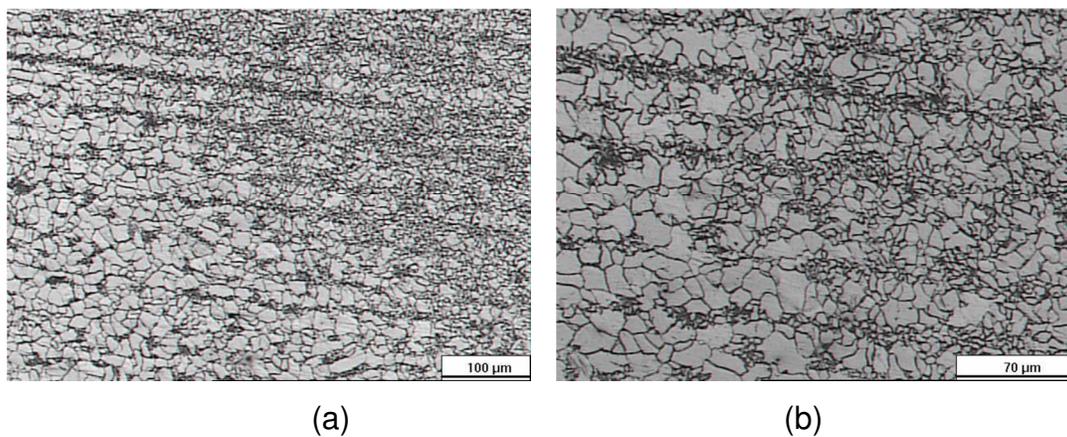


Figura 4.27. Microscopia de la interfase Metal Base-Zona Afectada Térmicamente (a) Aumento de 100X, (b) Aumento de 200X

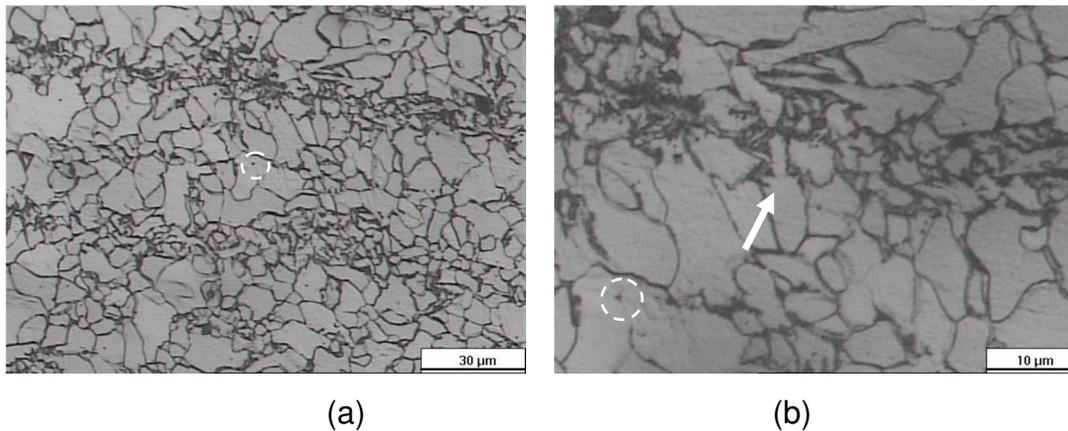


Figura 4.28. Microscopia de la interfase Metal Base-Zona Afectada Térmicamente (a) Aumento de 400X, (b) Aumento de 1000X

En las figuras 4.29 y 4.30 se observa perlita disgregada. La perlita presenta forma de estrella sobre la matriz ferrita. La estructura morfológica se ha transformado en a medida que se acerca al cordón de soldadura. Por otro lado para esta zona se observan inclusiones no metálicas.

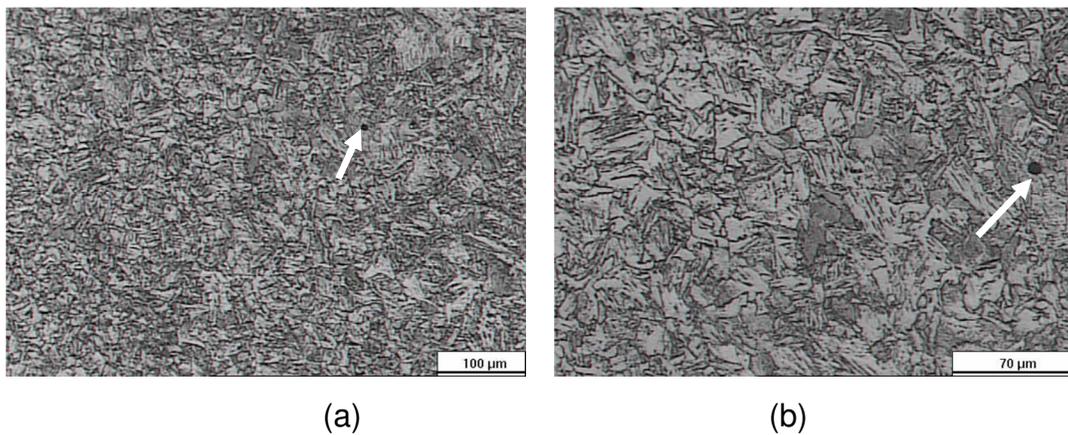


Figura 4.29. Microscopia de la Zona Afectada Térmicamente (a) Aumento de 100X, (b) Aumento de 200X

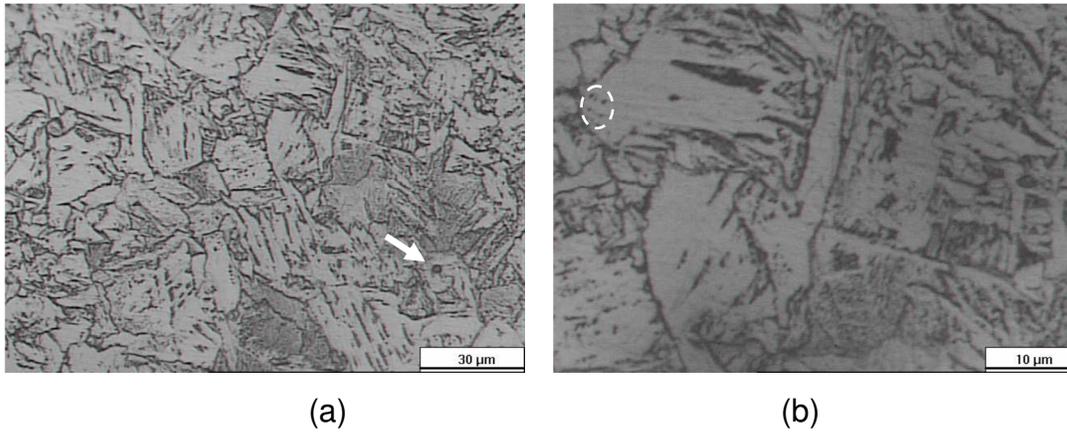


Figura 4.30. Microscopia de la Zona Afectada Térmicamente (a) Aumento de 400X, (b) Aumento de 1000X

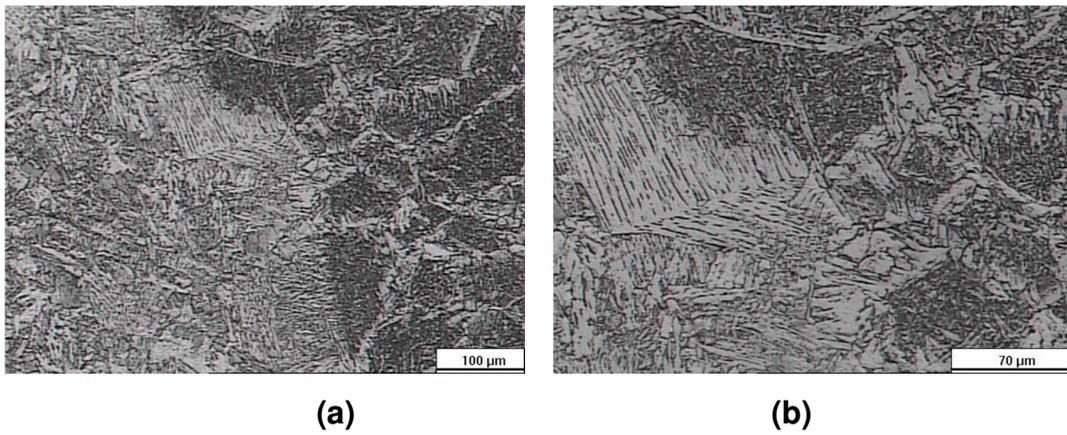


Figura 4.31. Microscopia de la interfase Zona Afectada Térmicamente-Cordón de Soldadura (a) Aumento de 100X, (b) Aumento de 200X

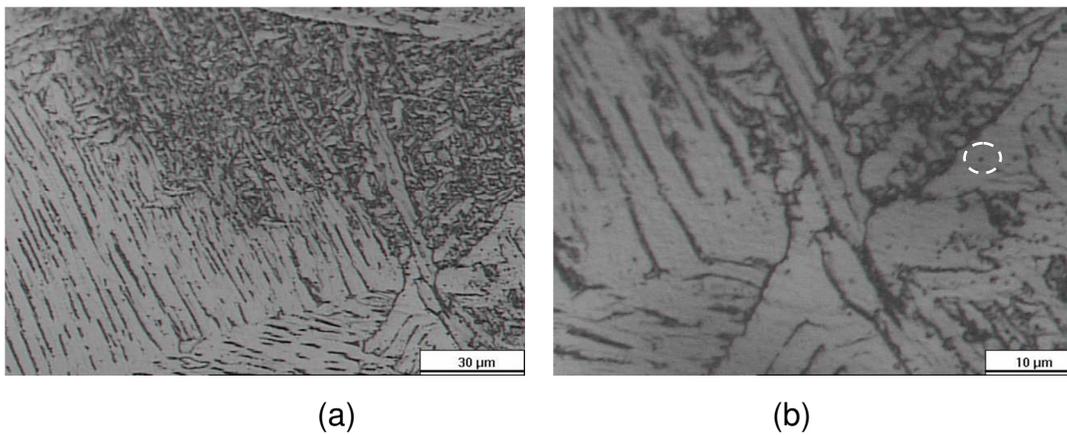


Figura 4.32. Microscopia de la interfase Zona Afectada Térmicamente-Cordón de Soldadura (a) Aumento de 400X, (b) Aumento de 1000X

Para las figuras 4.33 y 4.34, se hace evidente la estructura Widmanstätten presente en el cordón de soldadura. Se observa la perlita fina disgregada sobre la matriz ferrítica. Así mismo existe una gran cantidad de carburos no metálicos en esta zona así como también algunas inclusiones.

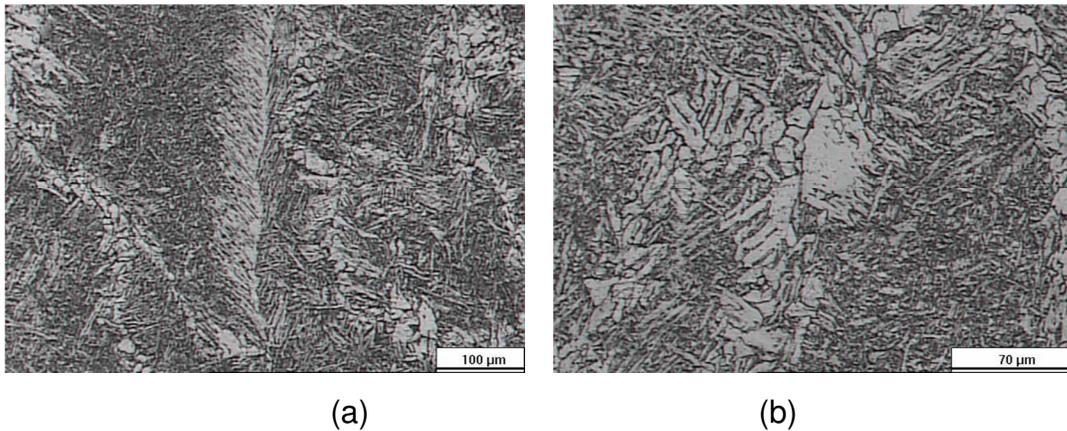


Figura 4.33. Microscopia del Cordón de Soldadura (a) Aumento de 100X, (b) Aumento de 200X

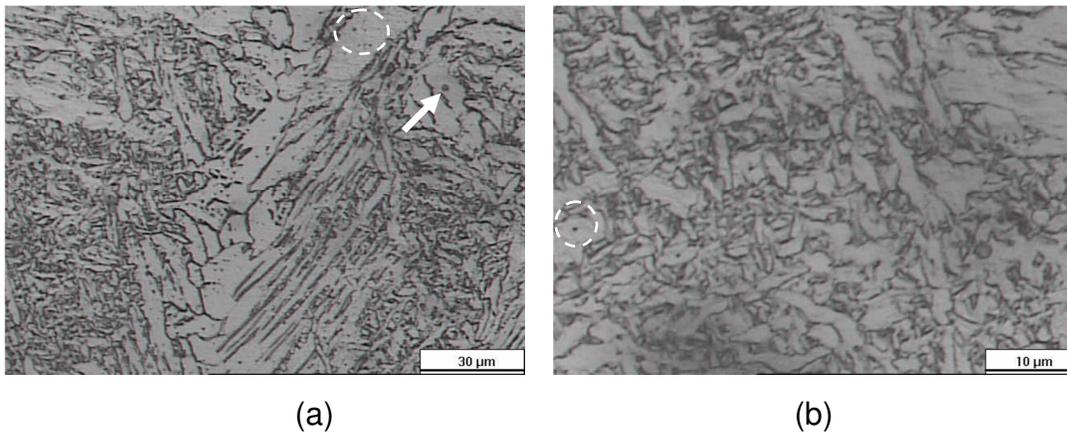


Figura 4.34. Microscopia del Cordón de Soldadura (a) Aumento de 400X, (b) Aumento de 1000X

En general, al igual que para el periodo de 48 hr, la microestructura no presentan cambios significativos al compararla con la microestructura obtenida en la caracterización del metal soldado, es decir, la microestructura no se vio afectada durante este periodo de exposición.

Medición del tamaño de grano.

Los resultados obtenidos para el tamaño de grano de las muestras sometidas a un periodo de exposición de 96 hr. se muestran en la tabla 4.14.

Tabla 4.14 Tamaño de grano para las muestras sometidas a la cámara salina por un periodo de 96 hr.

Zona	Número de Tamaño de Grano	
	Ferrita	Perlita
Zona metal base	7	7
Zona afectada por calor	8	8
Zona soldada	8	8

El tamaño de grano no se vio afectado por la exposición a la cámara salina durante este periodo de exposición. El tamaño de grano no vario en comparación al periodo anterior.

#### 4.4.3 Probetas sometidas por un periodo de 196 hr.

##### 4.4.3.1 Macroscopía.

A continuación se muestran en las figuras 4.35 y 4.36 los resultados obtenidos para el ensayo de macroscopía para un periodo de exposición de 196hr.

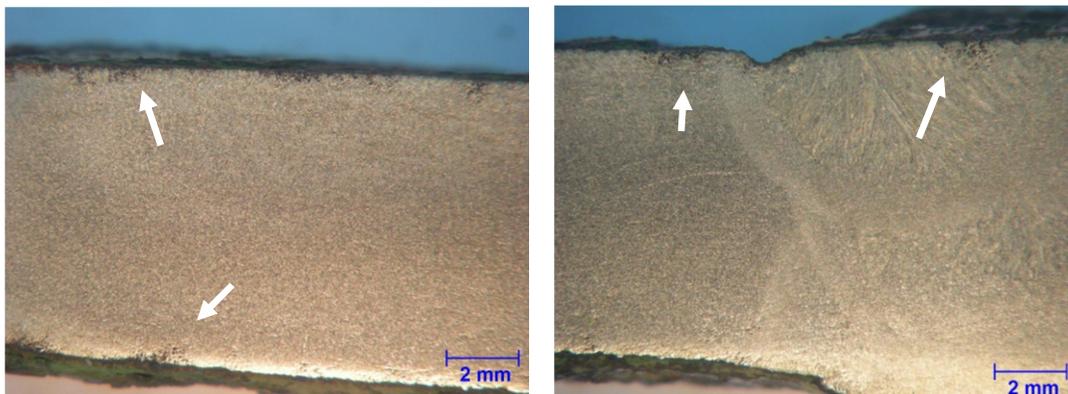


Figura 4.35. Macroscopía (a) Metal Base, (b) Metal base-ZAT-Cordón de Soldadura

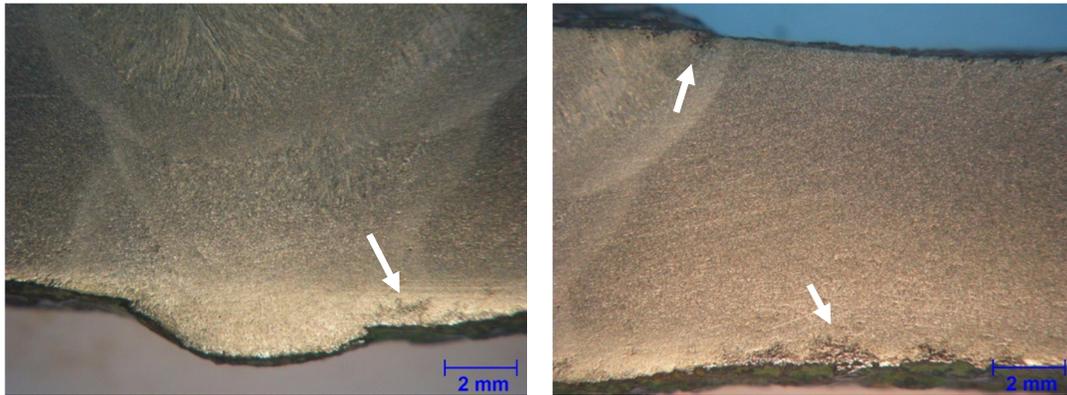


Figura 4.36 Macroscopía (a) Cordón de Soldadura y Defecto, (b) Metal base-ZAT-Cordón de Soldadura

En las figuras 4.35 y 4.36 se puede observar que los efectos de la corrosión son principalmente superficiales, al igual que el anterior se observó corrosión generalizada sobre toda la superficie en contacto directo con el ambiente corrosivo. Sin embargo para este periodo la presencia de corrosión localizada es mayor. Se observa un mayor número de zonas afectadas a lo largo de toda la superficie de la probeta.

#### 4.4.3.2. Microscopia.

Para las figuras 4.37 y 4.38 se observa la microestructura del metal base para un periodo de exposición de 196 hr. En ellas se muestra, al igual que en los periodos anteriores, la colonias de perlita en una matriz ferítica. Así mismo se observan carburos en la matriz ferrítica.

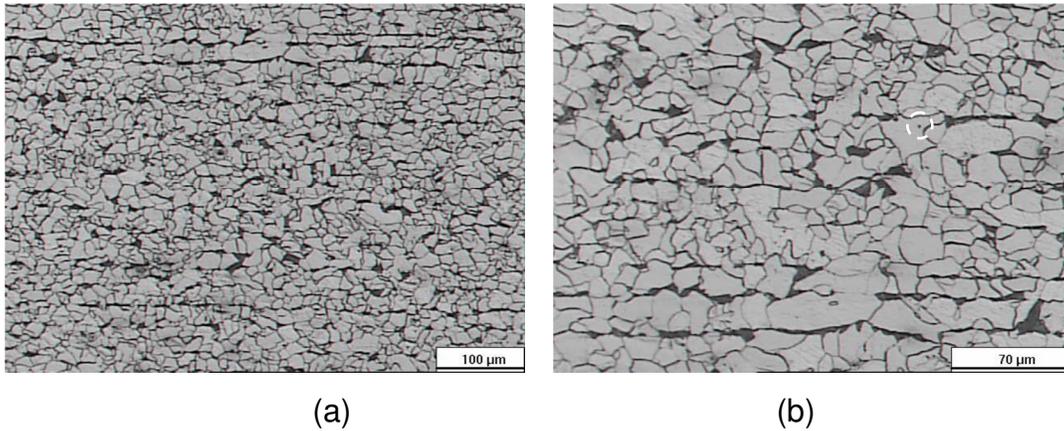


Figura 4.37. Microscopia del Metal Base (a) Aumento de 100X, (b) Aumento de 200X

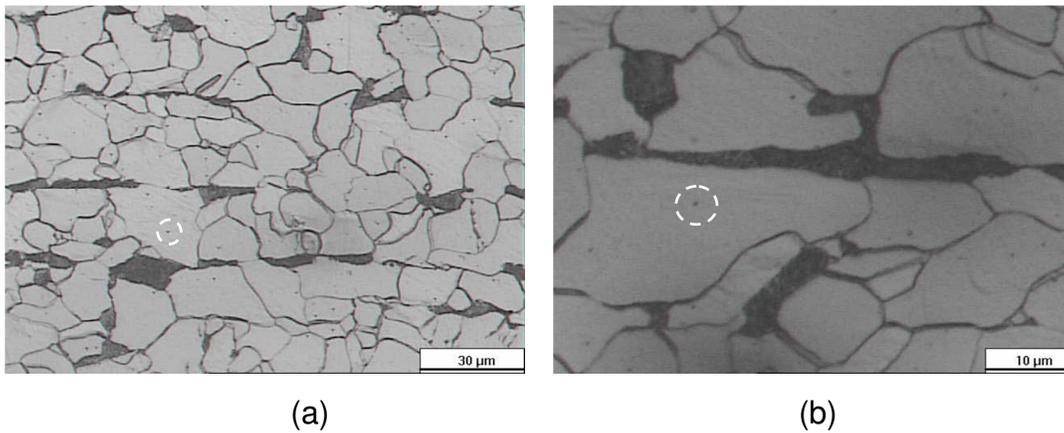


Figura 4.38. Microscopia del Metal Base (a) Aumento de 400X, (b) Aumento de 1000Xç

En las figuras 4.39 y 4.40 se observa como la estructura de la perlita empieza a transformarse en una forma estrellada en la zona afectada por el calor. En la Figura 4.40 (b), se observan zonas de perlita disgregada. Por otro lado la presencia de inclusiones no metálicas es evidente.

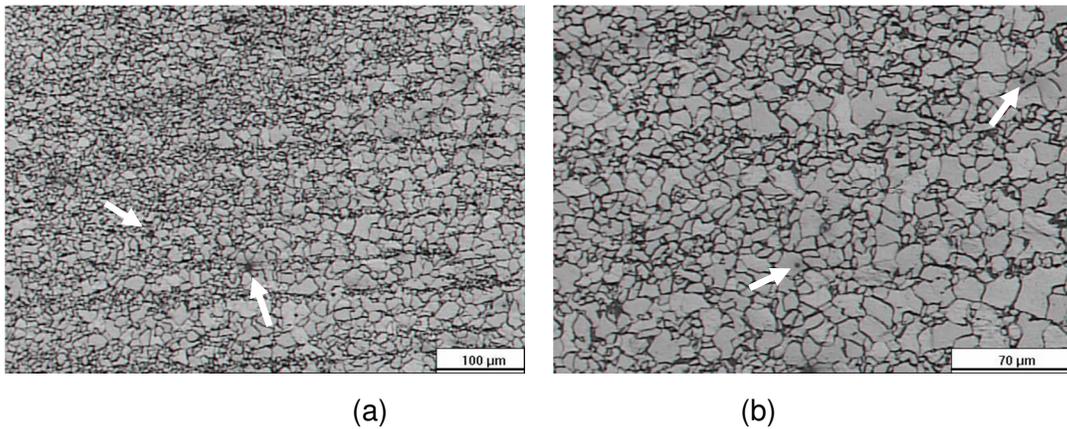


Figura 4.39. Microscopia de la interfase Metal Base-Zona Afectada Térmicamente (a) Aumento de 100X, (b) Aumento de 200X

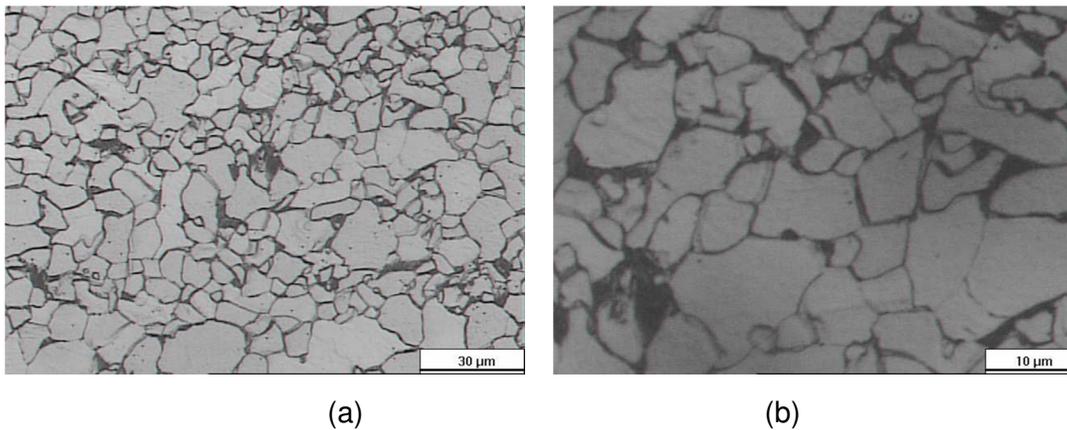


Figura 4.40. Microscopia de la interfase Metal Base-Zona Afectada Térmicamente (a) Aumento de 400X, (b) Aumento de 1000X

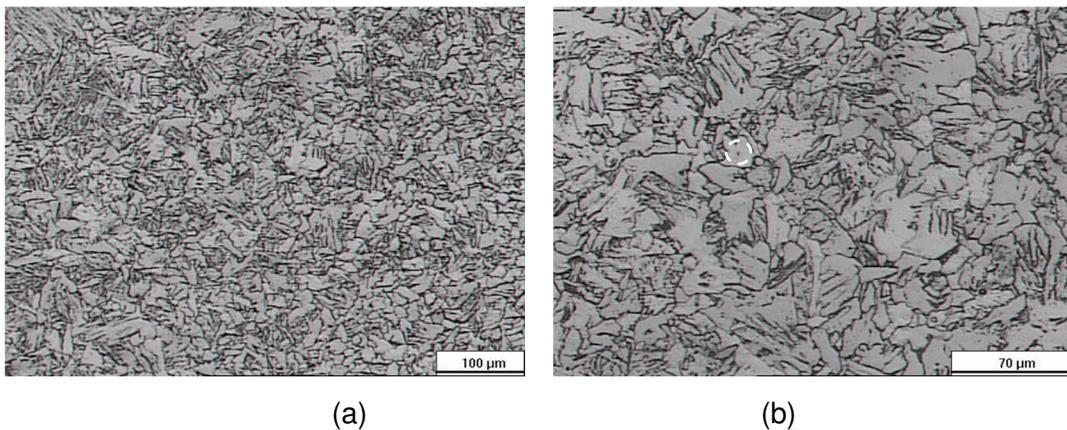


Figura 4.41. Microscopia de la Zona Afectada Térmicamente (a) Aumento de 100X, (b) Aumento de 200X

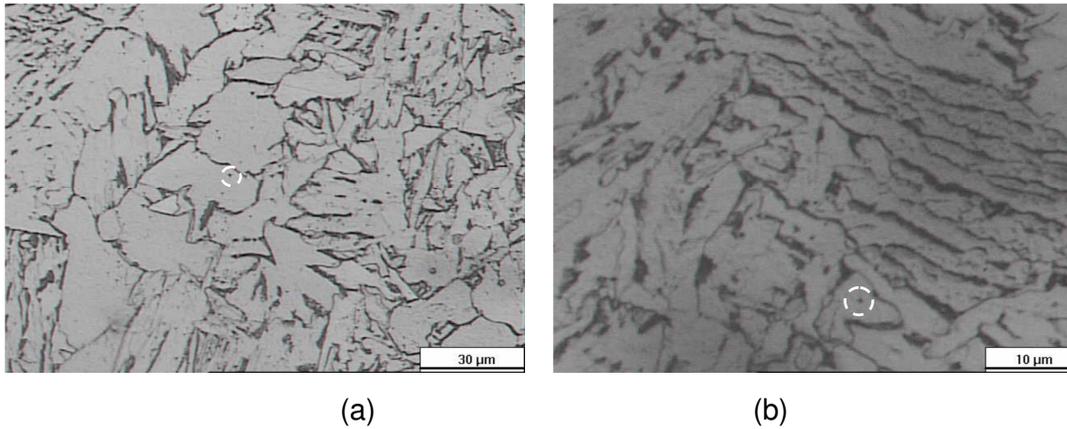


Figura 4.42. Microscopia de la Zona Afectada Térmicamente (a) Aumento de 400X, (b) Aumento de 1000X

En las figuras 4.43 y 4.44 se observa la transición al cordón de soldadura, donde la perlita se encuentra formando una estructura rayada, en forma estrellada. En las figuras 4.45 y 4.46 se observa la estructura de Widmanstätten (se observa ferrita y perlita acicular) propia del cordón de soldadura, estructura, que del mismo modo, se encontró en los dos periodos anteriores. En esta zona existe una gran cantidad de carburos.

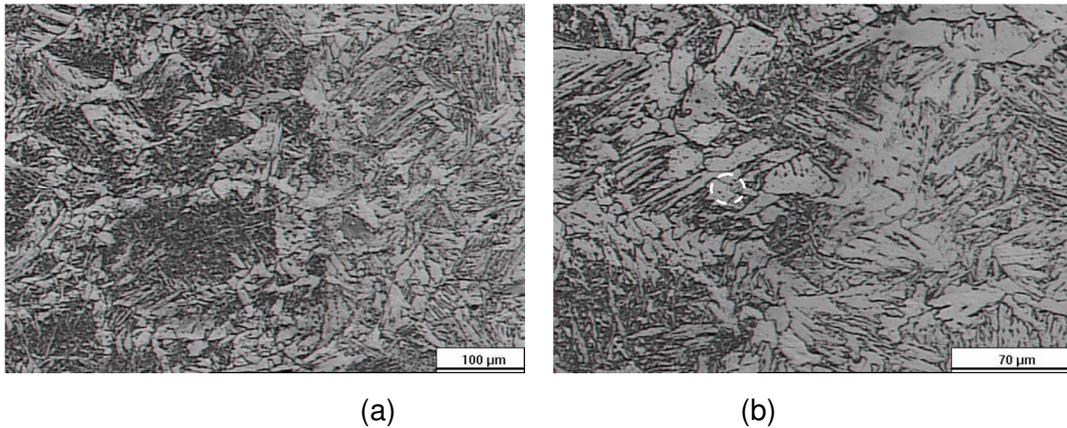
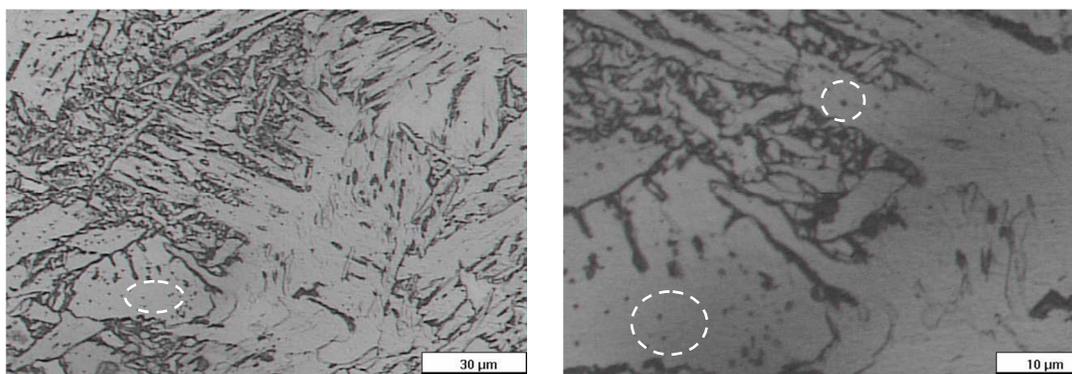


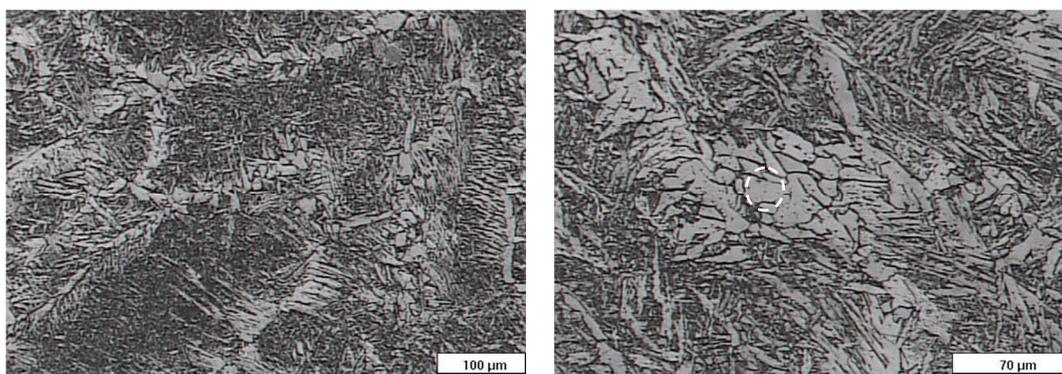
Figura 4.43. Microscopia de la interfase Zona Afectada Térmicamente-Cordón de Soldadura (a) Aumento de 100X, (b) Aumento de 200X



(a)

(b)

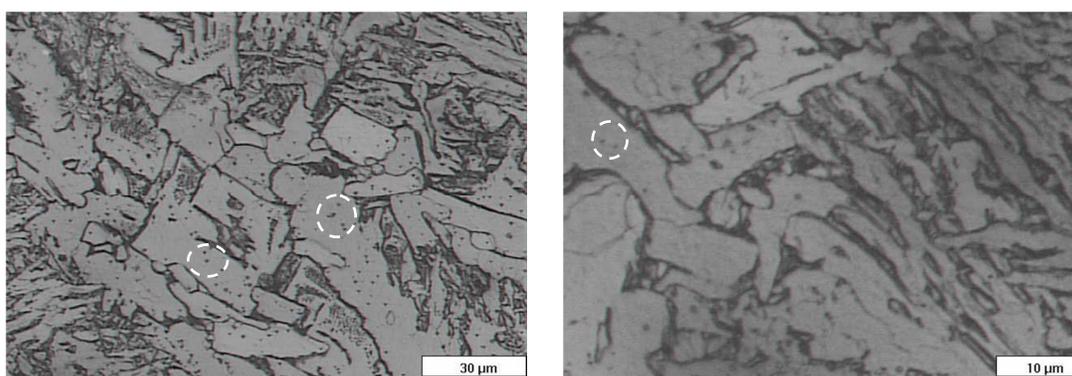
Figura 4.44. Microscopia de la interfase Zona Afectada Térmicamente-Cordón de Soldadura (a) Aumento de 400X, (b) Aumento de 1000X



(a)

(b)

Figura 4.45. Microscopia del Cordón de Soldadura (a) Aumento de 100X, (b) Aumento de 200X



(a)

(b)

Figura 4.46. Microscopia del Cordón de Soldadura (a) Aumento de 400X, (b) Aumento de 1000X

Medición del tamaño de grano.

Los resultados obtenidos para el tamaño de grano se muestran en la tabla 4.15. En ella se observa que, al igual que en los periodos anteriores, no se presenta variación alguna en comparación al tamaño obtenido en la caracterización del metal base.

Tabla 4.15 Tamaño de grano para las muestras soldadas

Zona	Número de Tamaño de Grano	
	Ferrita	Perlita
Zona metal base	7	7
Zona afectada por calor	8	8
Zona soldada	8	8

**4.4.4 Análisis de los ensayos de metalografía.**

Al observar las muestras anteriores se puede decir que:

- Los efectos de la corrosión fueron evidenciados principalmente en la superficie de la probeta.
- A medida que aumentaban los períodos de exposición de las muestras a la atmósfera corrosiva, los efectos de la corrosión fueron aumentando de manera gradual. Esto se le puede atribuir a los efectos de la corrosión generalizada, donde la capa de óxido exterior fue penetrando (muy poco) en las muestras a medida que aumentaban los periodos de exposición.
- Se observó la presencia de corrosión localizada en los límites de la superficie de la probeta. Este tipo de corrosión, para los dos primeros periodos, se observó primero en el cordón de soldadura, debido a las irregularidades de la superficie que permitieron el depósito de productos de la corrosión.

- Para los ensayos de microscopia no se mostraron cambios significativos, la misma no se vio afectada por la corrosión. Esto se debe a que los efectos de la corrosión fueron principalmente superficiales.
- Los efectos de la corrosión, en general, no fueron muy acentuados en las zonas alejadas a los límites de las muestras, zonas que no se encontraban en contacto directo con la atmósfera salina. Esto se puede deber, a que una vez formada la capa de óxido en la superficie de las muestras en las primeras horas de exposición, se ayuda a aislar el acero del ambiente corrosivo, y por consiguiente se disminuye la velocidad de corrosión.
- No se encontró evidencia para suponer que las inclusiones encontradas en el material afecten la resistencia a la corrosión en las soldaduras, pero está claro que tienen algún impacto en las propiedades mecánicas, y en caso de las soldaduras estar sometidas a esfuerzos, éstas podrían ser un lugar preferencial para el inicio de grietas y allí si entraría en juego su influencia en la resistencia a la corrosión de una manera indirecta.

## **4.5 Ensayos de Tracción**

### **4.5.1 Periodo de Exposición de 48 hr.**

En la figura 4.47 se observan las probetas una vez sometidas a los ensayos de tracción. En la figura 4.48 se observa el tipo de fractura obtenida, la cual es copa-cono, tipo de fractura característica de un material dúctil. Es importante resaltar que ninguna de las probetas fracturo en la zona soldada.

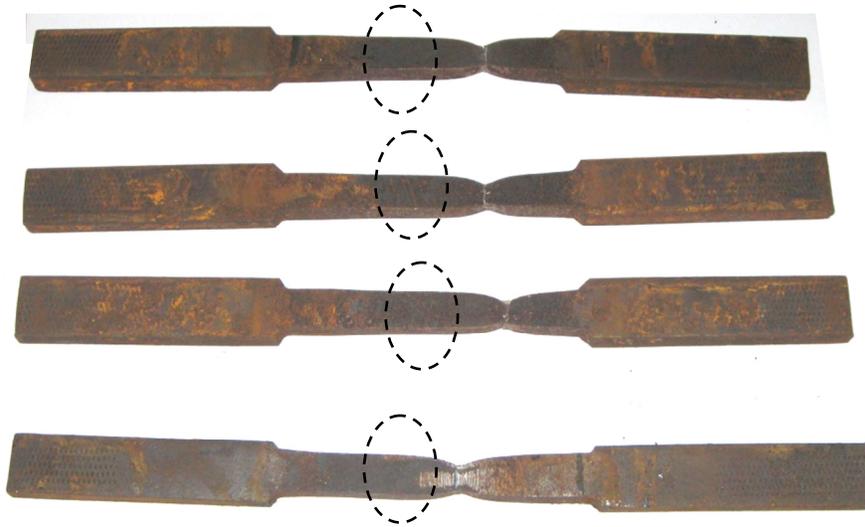


Figura 4.48 Probetas de tracción ensayadas para un periodo de exposición de 48 hr.



Figura 4.49 Fractura de las probetas de tracción ensayadas para un periodo de exposición de 48 hr.

En la figura 4.50 se observa el comportamiento obtenido luego de realizar los ensayos de tracción a las probetas sometidas por un periodo de 48 hr.

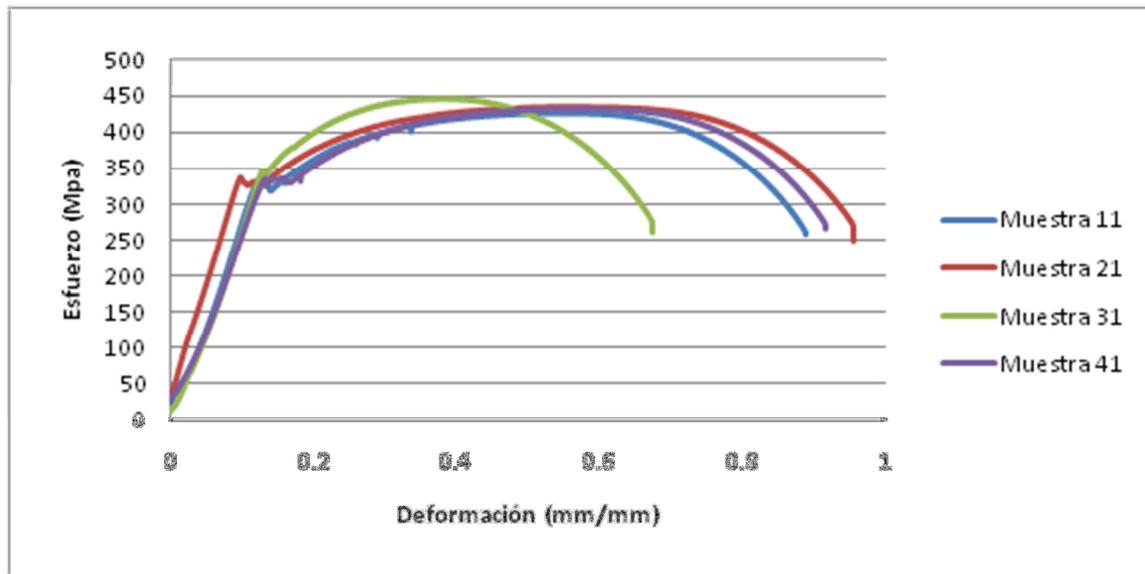


Figura 4.50 Ensayo de tracción de las probetas sometidas a la cámara salina por un periodo de 48 hr.

Una vez realizada la gráfica esfuerzo-deformación ingenieril se procede a calcular las propiedades mecánicas, expuestas en la tabla 4.13.

Tabla 4.13 Resultados del ensayo de tracción para un periodo de exposición de 48 hr.

Propiedades Mecánicas	Muestra 11	Muestra 21	Muestra 31	Muestra 41	Promedio	Desviación Estándar
<b>Esfuerzo de Fluencia (Y) [Mpa]</b>	322,01	329,09	342,20	331,25	331,14	8,36
<b>%RA</b>	68,52	67,80	68,52	68,52	68,34	0,36
<b>%E</b>	4,20	4,20	4,10	3,8	4,07	0,19
<b>Esfuerzo Máximo [MPa]</b>	427,59	434,92	446,43	432,61	435,39	7,97
<b>Esfuerzo de Rotura [MPa]</b>	258,73	249,44	261,69	265,84	258,93	6,96

Se puede observar en primera instancia que las gráficas esfuerzo-deformación ingenieril obtenidas son bastante similares entre sí, a excepción de la tercera muestra ensayada. Esta última presenta menor ductilidad y un mayor esfuerzo máximo, lo que se puede deber a la mayor presencia presencia de carburos.

Si comparamos las propiedades mecánicas obtenidas en este periodo con las propiedades obtenidas en los ensayos de tracción de las muestras soldadas (Tabla 4.3) se obtiene que todos los valores disminuyeron. Así tenemos que el esfuerzo de fluencia disminuyó en un 14,63 % y el esfuerzo máximo en un 12,82%.

#### 4.5.2 Periodo de Exposición de 96 hr.

En la figura 4.51 se observan las probetas ensayadas para un periodo de exposición de 96 hr. Así mismo en la figura 4.52 se observa el tipo de fractura obtenida. Se debe resaltar que sólo se ensayaron tres (3) probetas de las cuatro sometidas a la cámara salina durante este periodo, debido a fallas eléctricas al momento de realizar el ensayo de tracción.

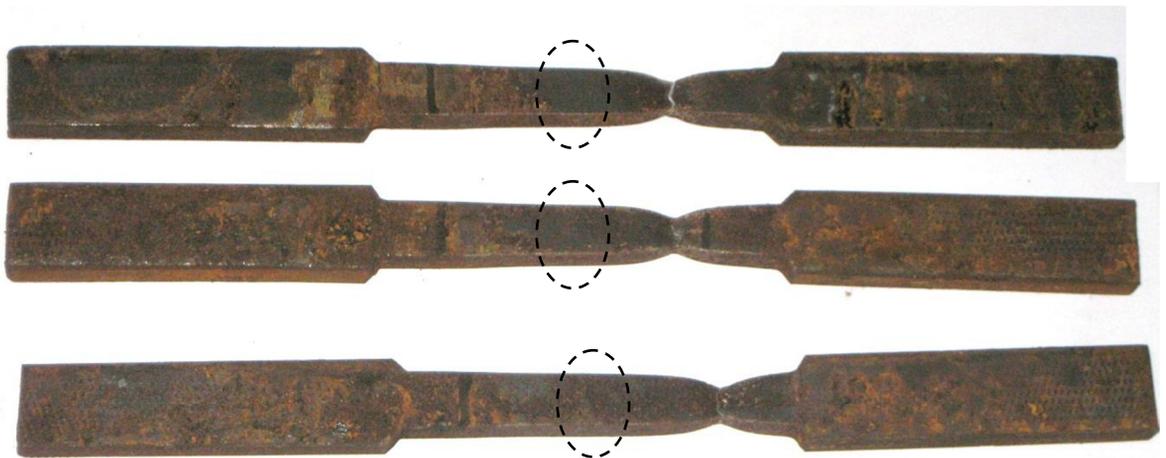


Figura 4.51 Probetas de tracción ensayadas para un periodo de exposición de 96 hr.



Figura 4.52 Fractura de las probetas de tracción ensayadas para un periodo de exposición de 96 hr.

En la figura 4.52 se observan las gráficas esfuerzo-deformación ingenieril de las probetas ensayadas para esta condición. Así mismo en la tabla 4.14 se observan las propiedades mecánicas obtenidas.

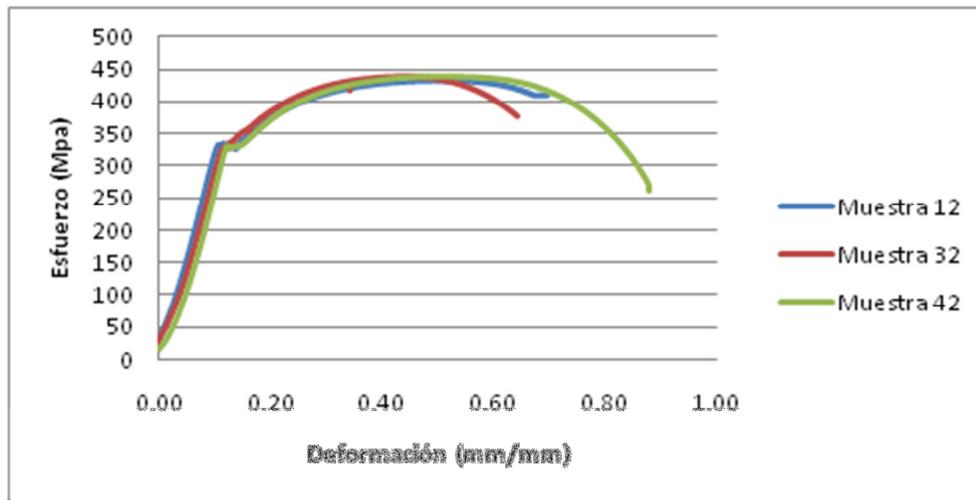


Figura 4.53 Ensayo de tracción de las probetas sometidas a la cámara salina por un periodo de 96 hr.

Tabla 4.14 Resultados del ensayo de tracción para un periodo de exposición de 96 hr.

Propiedades Mecánicas	Muestra 12	Muestra 32	Muestra 42	Promedio	Desviación Estándar
Esfuerzo de Fluencia (Y) [Mpa]	327,75	330,78	330,78	329,77	1,75
%RA	67,87	65,43	66,52	66,61	1,22
%E	3,60	3,62	3,80	3,67	0,11
Esfuerzo Máximo [MPa]	432,15	439,60	438,29	435,88	5,27
Esfuerzo de Rotura [MPa]	262,84	270,34	260,48	264,55	5,15

Las gráficas esfuerzo-deformación ingenieril obtenidas son bastantes similares entre sí por lo que la precisión de los resultados es confiable.

Al comparar los valores obtenidos en este periodo con los obtenidos en el periodo de exposición de 48 hr, se obtiene que los valores del porcentaje de

reducción de área y porcentaje de elongación, disminuyeron en porcentajes pequeños siendo el último el mayor con un valor de 6,2 %. En lo que respecta a los valores de esfuerzo de fluencia, esfuerzo máximo y esfuerzo de rotura permanecieron similares entre sí.

Por último si se comparan los valores de las propiedades mecánicas obtenidas en el ensayo de tracción del material soldado con los valores de las propiedades mecánicas de las probetas expuestas por un periodo de 96hr, se obtiene que los valores disminuyeron en un rango mayor.

#### 4.5.3 Periodo de Exposición de 196 hr.

En la figura 4.55 se observan las probetas ensayadas para un periodo de exposición de 196 hr. En la figura 4.56 se observa el tipo de fractura obtenida, es decir, copa-cono.

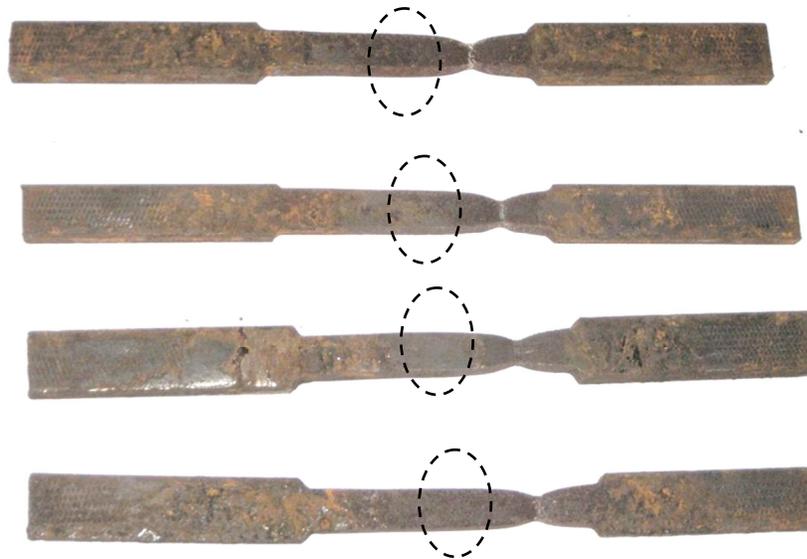


Figura 4.55 Probetas de tracción ensayadas para un periodo de exposición de 196 hr.



Figura 4.56 Fractura de las probetas de tracción ensayadas para un periodo de exposición de 196 hr.

En la figura 4.57 se observan las gráficas esfuerzo - deformación ingenieril para un periodo de exposición de 196 hr. Así mismo se muestran las propiedades mecánicas obtenidas a partir de las mismas en la tabla 4.15.

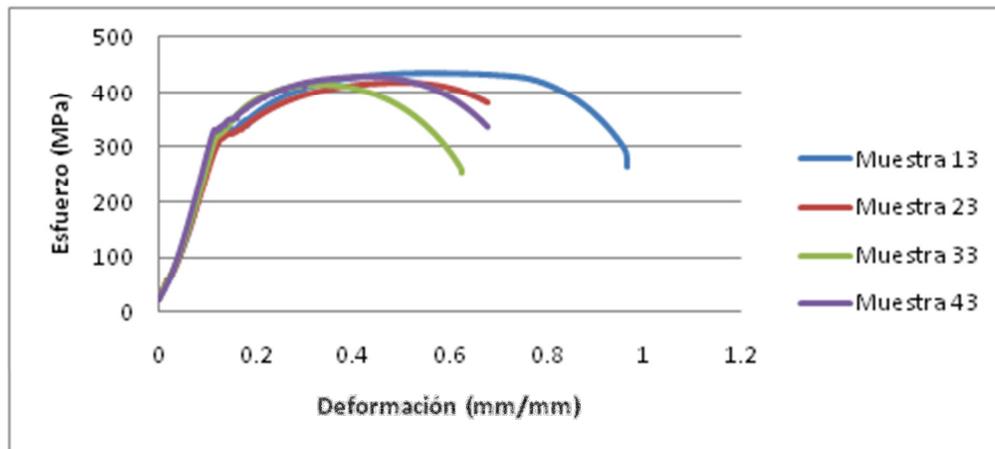


Figura 4.57 Ensayo de tracción de las probetas sometidas a la cámara salina por un periodo de 196 hr.

Tabla 4.15 Resultados del ensayo de tracción para un periodo de exposición de 196 hr.

Propiedades Mecánicas	Muestra 13	Muestra 23	Muestra 33	Muestra 43	Promedio	Desviación Estándar
Esfuerzo de Fluencia (Y) [Mpa]	334,80	316,93	324,70	331,62	327,01	7,93
%RA	66,41	65,44	69,63	67,71	67,30	1,81
%E	4,20	4,30	3,90	3,20	3,90	0,5
Esfuerzo Máximo [MPa]	436,40	416,46	415,26	428,58	422,52	8,57

<b>Esfuerzo de Rotura [MPa]</b>	264,54	255,44	254,51	239,31	249,75	9.06
---------------------------------	--------	--------	--------	--------	--------	------

En este periodo, se obtuvo al igual que en los periodos de exposición anterior, que las propiedades mecánicas obtenidas por el ensayo de tracción disminuyeron en comparación a las propiedades obtenidas en la caracterización del material soldado.

Así mismo los valores de esfuerzo de fluencia, esfuerzo máximo y esfuerzo de rotura, disminuyeron en comparación al periodo de 96 hr. de exposición. Por otro lado se observa que los valores de porcentaje de reducción de área y porcentaje de elongación aumentaron en una baja proporción.

#### 4.5.4 Análisis de Resultados

En las figuras 4.58 y 4.59 se muestran las gráficas de comparación de resultados obtenidos en los ensayos de tracción en la caracterización del metal soldado y los resultados obtenidos en los ensayos de tracción para cada uno de los periodos de exposición.

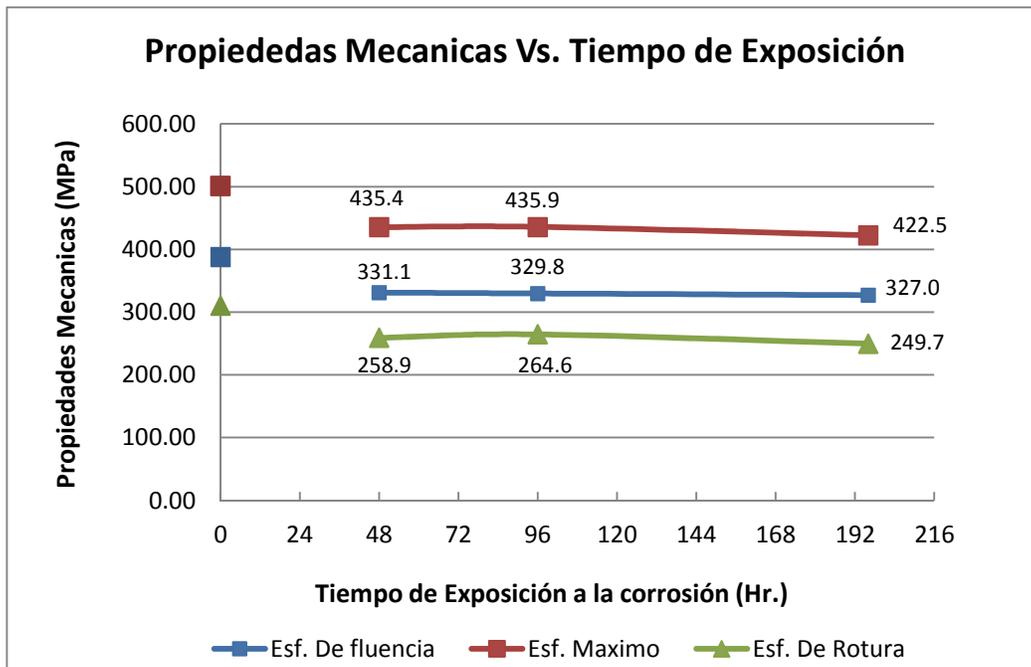


Figura 4.58 Propiedades Mecánicas Vs. Tiempo de Exposición

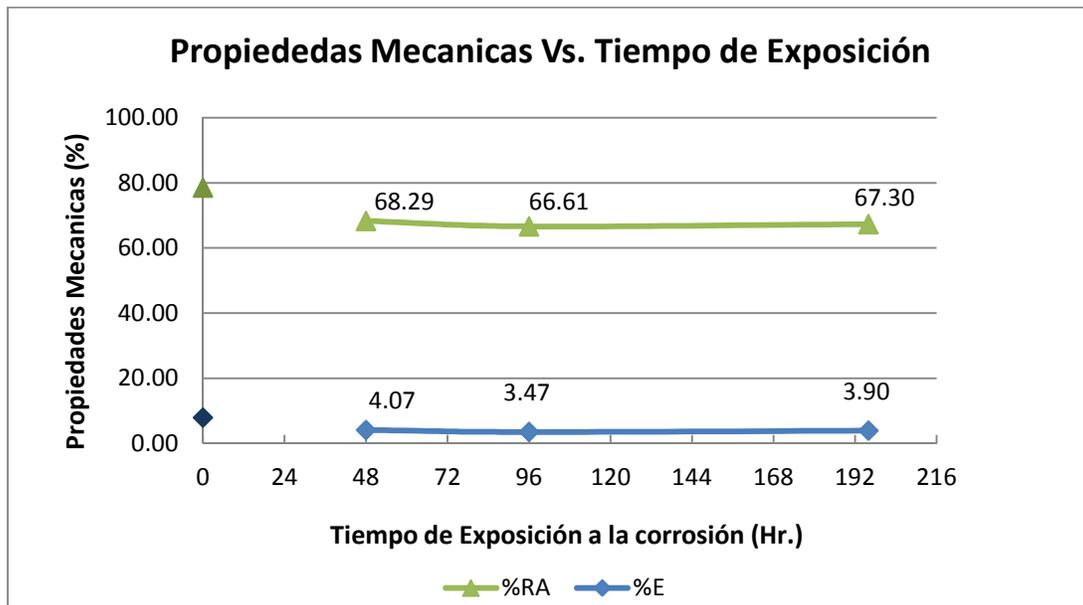


Figura 4.59 Porcentaje de reducción de área y porcentaje de reducción vs tiempo de exposición.

Tabla 4.16 Propiedades Mecánicas en los diferentes tiempo de exposición.

Propiedades Mecánicas	Muestra patrón	Muestras expuestas a la corrosión			
	0 hr.	48 hr.	96 hr.	196 hr.	
<b>Esfuerzo de Fluencia (Y) [Mpa]</b>	388,00	331,14	329,77	327,01	
<b>%RA</b>	78.57	68,34	66,61	67,30	
<b>%E</b>	7.92	4,07	3,47	3,90	
<b>Esfuerzo Máximo [MPa]</b>	501,05	435,39	435,88	422,52	
<b>Esfuerzo de Rotura [MPa]</b>	310,45	258,93	264.55	249,75	

Al observar las figuras 4.58 y 4.59 se observa que:

- Los esfuerzos de fluencia, esfuerzo máximo y esfuerzo de rotura, presentaron una disminución después de someter a las probetas al primer periodo de exposición. Para los periodos siguientes, los valores disminuyen progresivamente. Sin embargo esta disminución fue muy poca, ya que se puede observar que la tendencia es casi lineal. Por lo anterior se puede

decir, que las propiedades mecánicas se vieron afectadas por la corrosión, para el primer periodo. Para los periodos subsiguientes las propiedades no se vieron muy afectadas, lo que se le puede atribuir a la capa de óxido formada alrededor de la superficie, la cual genero cierto efecto protector.

- El porcentaje de reducción de área disminuyo en un 13,00 % una vez transcurrido el periodo de exposición de 48 hr. Esto puede deberse a la acción de la corrosión, la cual generó una pérdida de material. Para los periodos de exposición siguientes este valor permaneció casi constante. El porcentaje de reducción de área está asociado a la ductilidad del material, por lo que se puede decir que el material, en términos generales, no varió la ductilidad.
- El porcentaje de alargamiento presenta el mismo comportamiento que el porcentaje de reducción de área, es decir, disminuyó para el periodo de exposición de 48 hr, sin embargo, a diferencia del anterior esta disminución fue muy poca. Para los periodos subsiguientes, el porcentaje de elongación no presento grandes variaciones, se estabiliza en una recta. El porcentaje de alargamiento es también un indicador de ductilidad, por lo que se puede decir que esta propiedad no varió.

## **4.6 Ensayos de Microdureza**

### **4.6.1 Probetas sometidas por un periodo de 48 hr.**

A continuación se muestran los valores de dureza para las tres (3) muestras ensayadas, sometidas a la cámara salada por un periodo de 48 hr.

Tabla 4.17 Resultado de las pruebas de dureza de la muestra N°1

<b>Muestra N°1</b>					
<b>Zona</b>	<b>HV<sub>1</sub></b>	<b>HV<sub>2</sub></b>	<b>HV<sub>3</sub></b>	<b>Promedio</b>	<b>Desviación Estándar</b>
<b>ZS</b>	269	277	256	267,33	10,60
<b>ZAC</b>	234	227	248	226,66	10,69
<b>ZMB</b>	226	223	227	233	2,08

Tabla 4.18 Resultado de las pruebas de dureza de la muestra soldada N°2

<b>Muestra N° 2</b>					
<b>Zona</b>	<b>HV<sub>1</sub></b>	<b>HV<sub>2</sub></b>	<b>HV<sub>3</sub></b>	<b>Promedio</b>	<b>Desviación Estándar</b>
<b>ZS</b>	262	260	275	258,66	8,14
<b>ZAC</b>	260	241	261	261	11,27
<b>ZMB</b>	235	228	198	220,33	19,66

Tabla 4.19 Resultado de las pruebas de dureza de la muestra soldada N°3

<b>Muestra N°3</b>					
<b>Zona</b>	<b>HV<sub>1</sub></b>	<b>HV<sub>2</sub></b>	<b>HV<sub>3</sub></b>	<b>Promedio</b>	<b>Desviación Estándar</b>
<b>ZS</b>	253	261	267	260,33	7,02
<b>ZAC</b>	258	248	250	252	5,29
<b>ZMB</b>	225	234	224	227,66	5,51

En la figura 4.60 se observa que la zona soldada presenta el mayor valor de dureza seguida por la zona afectada por el calor y la zona del metal base, es decir, presenta la misma tendencia decreciente obtenida en la caracterización de las muestras soldadas sin ser sometidas a la cámara salina.

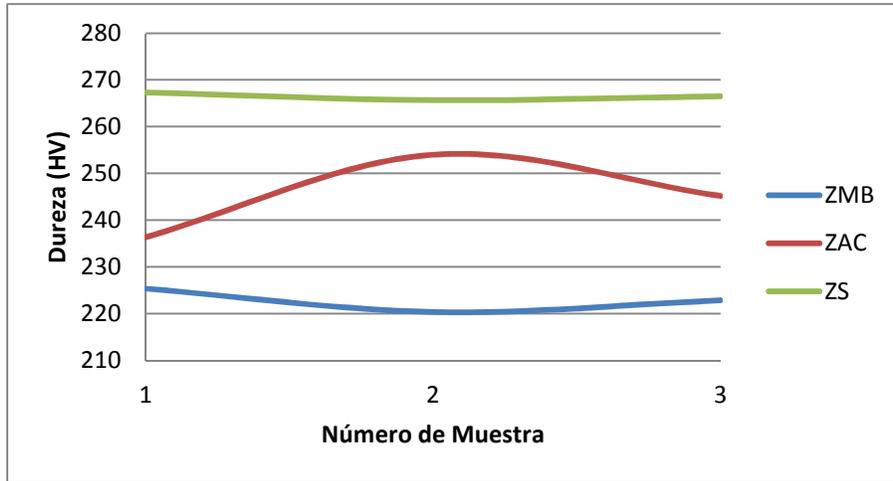


Figura 4.60 Valores de durezas de las muestras sometidas por un periodo de 48 hr.

Tabla 4.20 Dureza HV para las muestras sometidas a un periodo de 48hr.

Zona de análisis (48 hr. de exposición)	ZS	ZAC	ZMB
<b>Muestra 1</b>	267,33	226,66	233,00
<b>Muestra 2</b>	258,66	261,00	220,33
<b>Muestra 3</b>	260,33	252,00	227,66
<b>Promedio</b>	262,11	256,50	226,665
<b>Desviación Estándar</b>	4,60	6,36	8,96

Al obtener un promedio de los valores de dureza para cada zona se observa que el comportamiento decreciente tiende a ser lineal. En la figura 4.61 se comparan los valores de dureza de las muestras sometidas a la cámara salina por un periodo de 48 hr. con los arrojados en la caracterización del material soldado, donde se obtiene que los valores de dureza de las probetas sometidas a la cámara salina son mayores. En lo que respecta a la zona afectada por el calor, su dureza aumentó en un 16,43%, siendo el valor más significativo. En la zona soldada aumentó en un 6,54% y en la zona del metal base en un 12,50%.

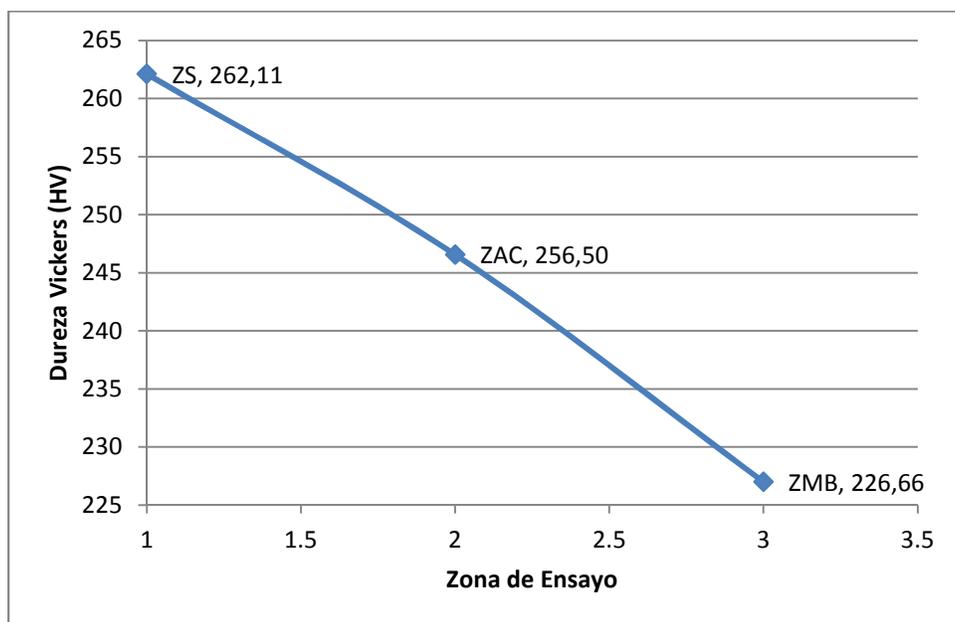


Figura 4.61 Valores promedio de dureza de las zonas ensayadas en un periodo de 48 hr

#### 4.6.2 Probetas sometidas por un periodo de 96 hr.

Tabla 4.21 Resultado de las pruebas de dureza de la muestra soldada N°1

Muestra N°1					
Zona	HV <sub>1</sub>	HV <sub>2</sub>	HV <sub>3</sub>	Promedio	Desviación Estándar
ZS	270	292	272	278,00	12,16
ZAC	217	232	219	222,66	8,14
ZMB	204	205	202	203,66	1,53

Tabla 4.22 Resultado de las pruebas de dureza de la muestra soldada N°2

Muestra N°2					
Zona	HV <sub>1</sub>	HV <sub>2</sub>	HV <sub>3</sub>	Promedio	Desviación Estándar
ZS	281	279	282	280,66	1,52
ZAC	246	240	250	245,33	5,03
ZMB	214	232	209	218,33	12,10

Tabla 4.23 Resultado de las pruebas de dureza de la muestra soldada N°3

Muestra N°3					
Zona	HV <sub>1</sub>	HV <sub>2</sub>	HV <sub>3</sub>	Promedio	Desviación Estándar
ZS	241	250	268	253,00	13,74
ZAC	236	209	222	222,33	13,50
ZMB	193	202	212	202,33	9,50

En la figura 4.62 se observa la dispersión de los valores de dureza para las muestras ensayadas.

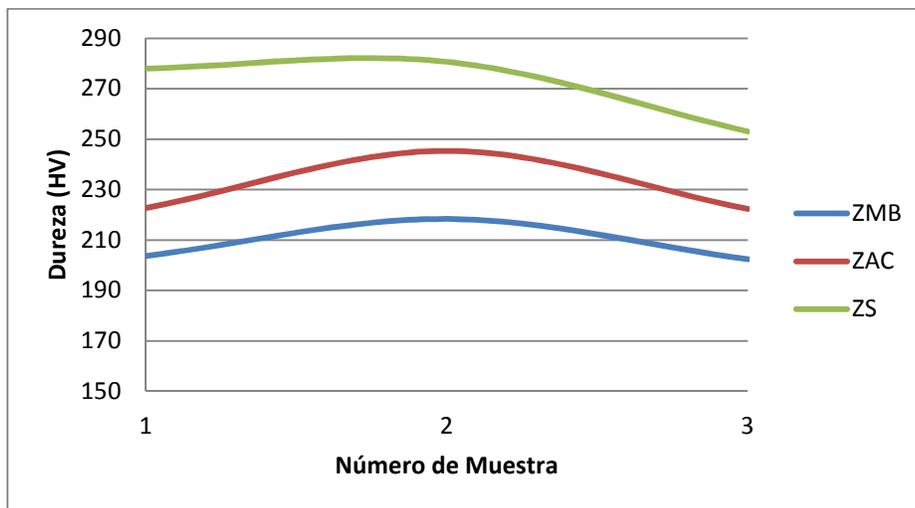


Figura 4.62 Valores de durezas de las muestras sometidas por un periodo de 96 hr.

Tabla 4.24 Dureza HV para las muestras sometidas a un periodo de exposición de 96 hr.

Zona de análisis (96 hr. de exposición)	ZS	ZAC	ZMB
Muestra 1	278	222,66	203,66
Muestra 2	280,66	245,33	218,33
Muestra 3	253	222,33	202,33
Promedio	265,5	230,10	208,10
Desviación Estándar	17,68	13,18	8,88

Se observa en la figura 4.63 que la tendencia de la gráfica se mantiene decreciente, siendo la zona soldada la de mayor dureza. Si comparamos los

valores de la tabla 4.24 con los valores obtenidos en la caracterización de metal soldado, se obtiene que los valores de dureza de las muestras sometidas a la cámara salina son mayores, siendo la zona afectada por el calor la más significativa con un aumento del 9,97%.

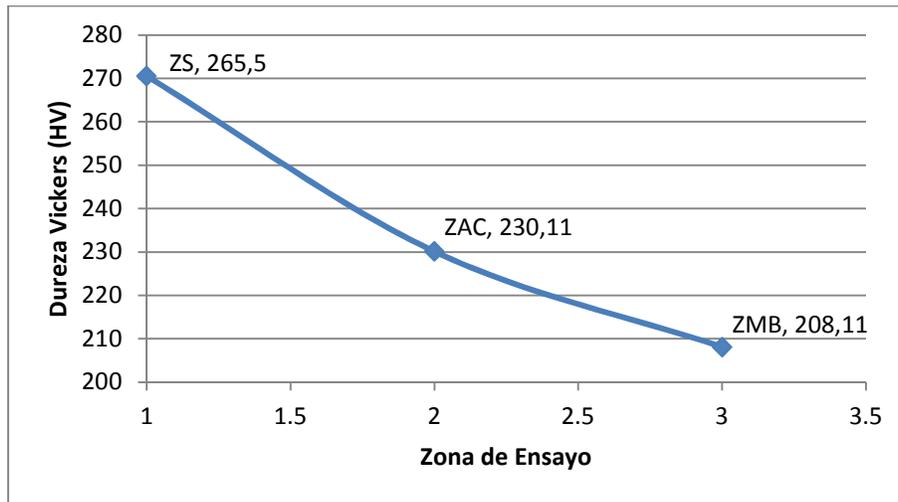


Figura 4.63 Valores promedio de dureza de las zonas ensayadas por un periodo 96hr.

Así mismo al comparar los valores de dureza de las muestras sometidas a la cámara salina por un periodo de 96 hr con los valores de dureza de las muestras sometidas por un periodo de 48 hr, se tiene que la dureza de la zona soldada aumentó en un 3,93 %. Por otro lado para el caso de la zona afectada por el calor, el valor de dureza disminuyó en un 9,51%, de igual forma para la zona del metal base en un 9,39 %.

#### 4.6.3 Probetas sometidas por un periodo de 196 hr

Tabla 4.25 Resultado de las pruebas de dureza de la muestra soldada N°1

Muestra N°1					
Zona	HV <sub>1</sub>	HV <sub>2</sub>	HV <sub>3</sub>	Promedio	Desviación Estándar
ZS	260	230	241	243,66	15,17
ZAC	212	212	216	213,33	2,31
ZMB	185	177	173	178,33	6,11

Tabla 4.26 Resultado de las pruebas de dureza de la muestra soldada N°2

Muestra N°2					
Zona	HV <sub>1</sub>	HV <sub>2</sub>	HV <sub>3</sub>	Promedio	Desviación Estándar
ZS	266	262	270	266	4,00
ZAC	235	230	217	227,33	9,29
ZMB	211	209	199	206,33	6,42

Tabla 4.27 Resultado de las pruebas de dureza de la muestra soldada N°3

Muestra N°3					
Zona	HV <sub>1</sub>	HV <sub>2</sub>	HV <sub>3</sub>	Promedio	Desviación Estándar
ZS	254	248	249	250,33	3,21
ZAC	213	217	226	218,66	6,65
ZMB	202	224	196	207,33	14,74

En la figura 4.64, se observa la dispersión de los valores de dureza obtenidos para un periodo de 196hr. Se tiene que la zona soldada presenta el mayor valor de dureza seguida por la zona afectada por el calor y la zona del metal base.

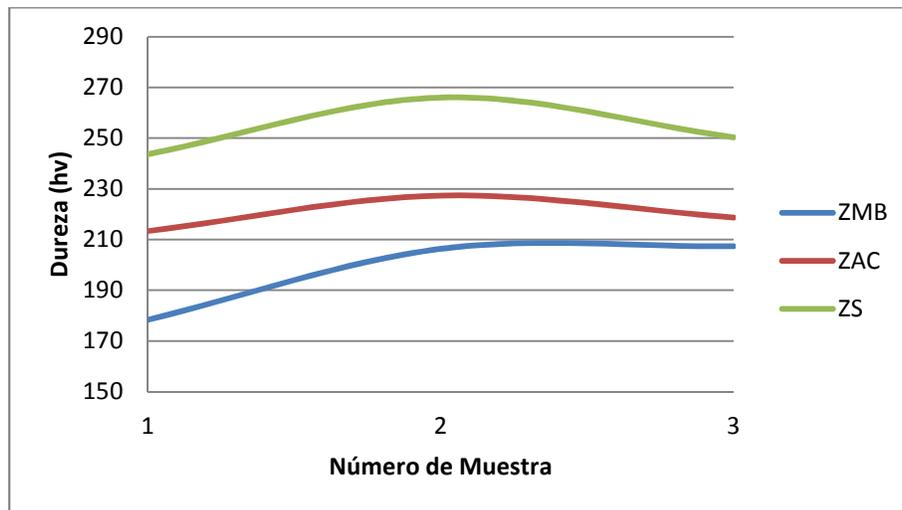


Figura 4.64 Valores de durezas de las muestras sometidas por un periodo 196 hr.

Tabla 4.28 Dureza HV para las muestras sometidas a un periodo de exposición de 196hr.

Zona de análisis (196 hr. de exposición)	ZS	ZAC	ZMB
Muestra 1	243,66	213,33	178,33
Muestra 2	266,00	227,33	206,33
Muestra 3	250,33	218,66	207,33
Promedio	253,33	219,77	192,33
Desviación Estándar	11,47	7,07	19,80

En la figura 4.65 se observa que, para este periodo al igual que en los dos periodos anteriores (48 hr y 96 hr respectivamente), la tendencia se mantuvo decreciente. Sin embargo al comparar los valores de dureza con los obtenidos en la caracterización del material soldado, el valor de dureza de la zona del metal base disminuyó en un 13,15 %. Los valores de las otras dos zonas permanecieron siendo mayores en una baja proporción.

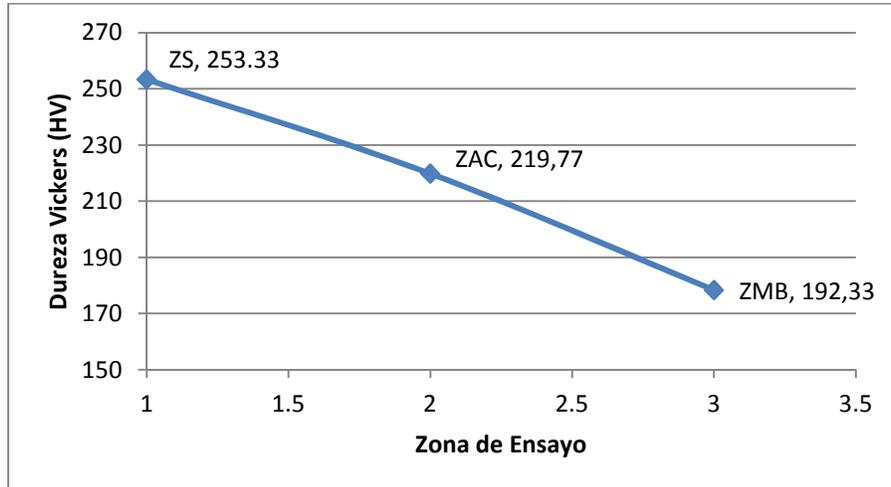


Figura 4.65 Valores promedio de dureza de las zonas ensayadas por un periodo de 196hr.

Por otro lado al comparar los valores de dureza de las muestras sometidas a la cámara salina por 196hr con los valores de dureza de las muestras sometidas por 48hr, se obtiene que los valores de dureza disminuyeron. Así tenemos que para la zona soldada el valor de dureza disminuyó en un 3,46 %, la dureza de la

zona afectada por el calor disminuyó en un 12,18% y el valor de la zona del metal base en un 37,29 %.

Por último al comparar los valores de dureza de las probetas sometidas a la cámara salina por un periodo de 196 hr con los valores de dureza de las probetas sometidas por 96 hr se obtiene que, de igual forma, los valores disminuyeron, siendo el valor de la dureza de la zona del metal base la que obtuvo una mayor diferencia con un porcentaje de un 16,69 %.

#### 4.5.4 Análisis de los ensayos de dureza

Tabla 4.29 Valores de dureza de los diferentes tiempos de exposición.

Propiedades Mecánicas	Muestra patrón	Muestras expuestas a la corrosión		
	0 hr.	48 hr.	96 hr.	196 hr.
ZS	246	262,11	265,5	253,33
ZAC	211,74	256,50	230,10	219,77
ZMB	201,78	226,665	208,10	192,33

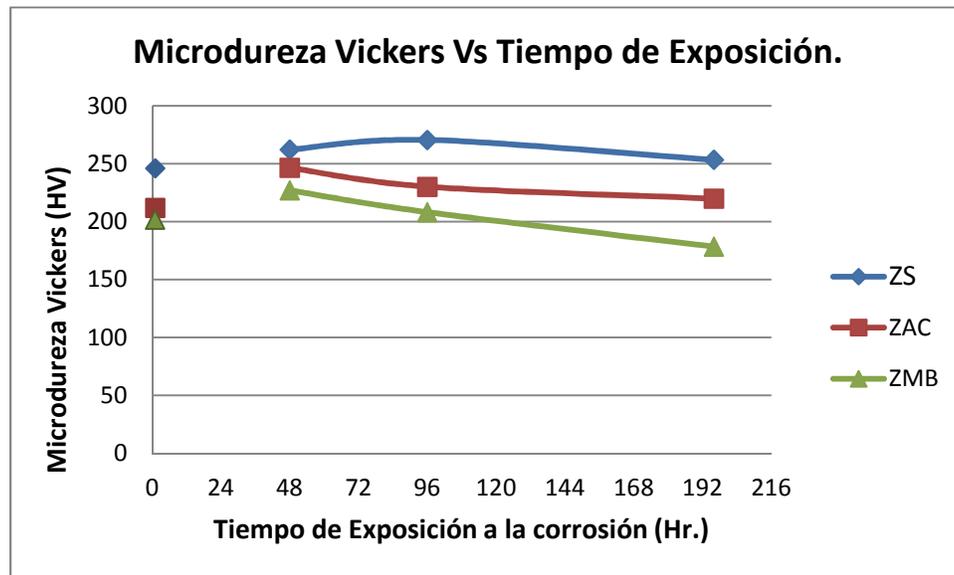


Figura 4.66 Valores de dureza de los diferentes tiempos de exposición.

En la figura anterior se puede observar que:

- La dureza de las diferentes zonas aumentó levemente luego de someter a las probetas por un periodo de 48hr de exposición. Lo anterior posiblemente es debido a la capa de óxido formada en las primeras horas de exposición. La dureza de esta capa es ligeramente mayor.
- Los valores de dureza para las muestras una vez sometidas a la cámara salina disminuyeron a medida que aumentaba el periodo de exposición. Sin embargo esta disminución fue leve para zona soldada, por lo que se puede decir que su dureza no se vió afectada. La dureza de la zona afectada por el calor y la zona del metal base disminuyeron, a partir del periodo de exposición de 48hr Estos efectos se pueden atribuir a la corrosión.

## **4.7 Ensayos de Impacto.**

### **4.7.1 Probetas sometidas por un periodo de 48hr.**

A continuación se muestran los resultados obtenidos para el ensayo de impacto de las probetas sometidas a la cámara salina durante un periodo de 48 hr. de exposición.

En la figura 4.67 y 4.68 se observan para el ensayo de impacto, las probetas sometidas a un periodo de 48 hr. Todas las probetas fracturaron en la zona soldada. A través de la inspección visual de la superficie fracturada, se observa que la fractura es de tipo dúctil. Para ninguna de las muestras hubo fractura completa del material.



Tabla 4.67 Fractura de las probetas para el ensayo de impacto para un periodo de exposición de 48hr.

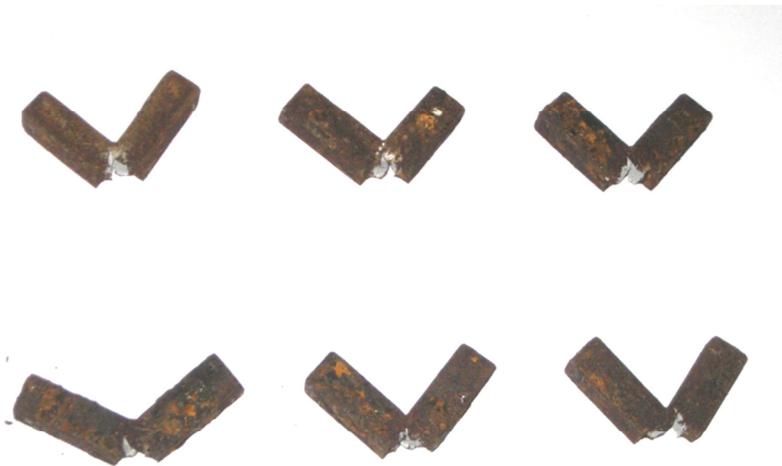


Figura 4.68 Probetas ensayadas para el ensayo de impacto para un periodo de exposición de 48hr.

En la tabla 4.30 se muestran los valores de tenacidad obtenidos para un periodo de 48 hr.

Tabla 4.30 Resultados para el ensayo de impacto para un periodo de 48 hr.

Probeta	1	2	3	4	5	6	Promedio	Desviación Estándar
Angulo	85°	72°	43°	49°	86°	60°	65,83	18,17
Tenacidad	Kpm	8	9.8	12.9	12.4	8	10,38	2,13
	J	78.5	96.13	126.5	121.64	78.48	101,86	20,93



Figura 4.69. Gráfica de dispersión de los resultados del ensayo de impacto para un periodo de exposición de 48 hr.

Al comparar los valores de tenacidad de la tabla 4.30, con los resultados obtenidos para los ensayos de impacto del material soldado, se obtuvo que los valores de las muestras sometidas a ambiente corrosivo, son ligeramente más elevados.

#### 4.7.2 Probetas sometidas por un periodo de 96 hr.

En las figuras 4.70 y 4.71, se observan las probetas ensayadas para un periodo de 96 hr, donde todas, al igual que en periodo anterior, fracturaron en la zona donde se encontraba la muesca, es decir, la zona soldada. Así mismo es importante resaltar que no hubo fractura completa del material. A través de la figura 4.71, se observa que el tipo de fractura obtenida es dúctil.



Tabla 4.70 Fractura de las probetas para el ensayo de impacto para un periodo de exposición de 96hr.

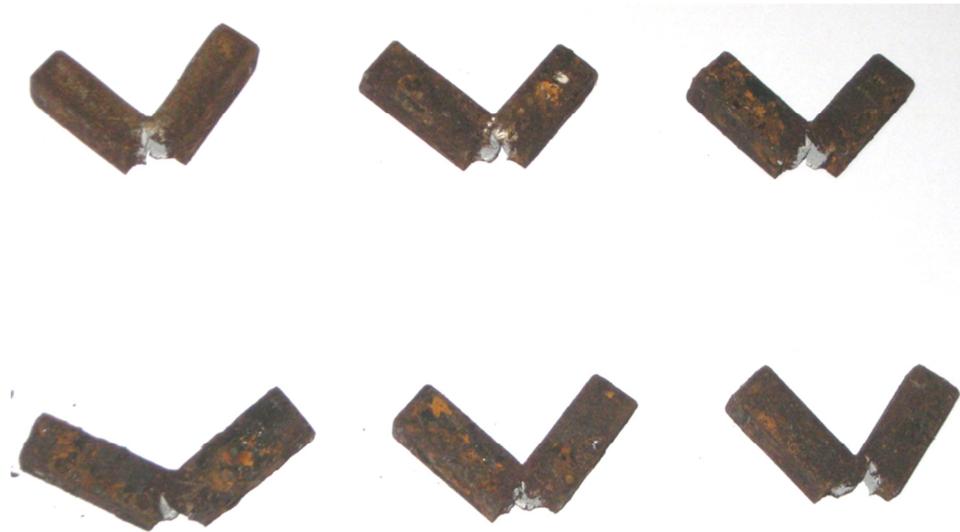


Figura 4.71 Probetas ensayadas para el ensayo de impacto para un periodo de exposición de 96hr.

En la tabla 4.31 se muestran los valores de tenacidad obtenidos para las probetas sometidas a la cámara salina durante un periodo de 96 hr. de exposición.

Tabla 4.31 Resultados para el ensayo de impacto para un periodo de 96 hr.

Probeta	1	2	3	4	Promedio	Desv. Esta	
Angulo	75°	40°	47°	69°	57,75°	16,87	
Tenacidad	Kpm	9.5	13.2	13.4	10.2	11.58	2.01
	J	93.195	129.492	131.5	100.062	113.55	19.76

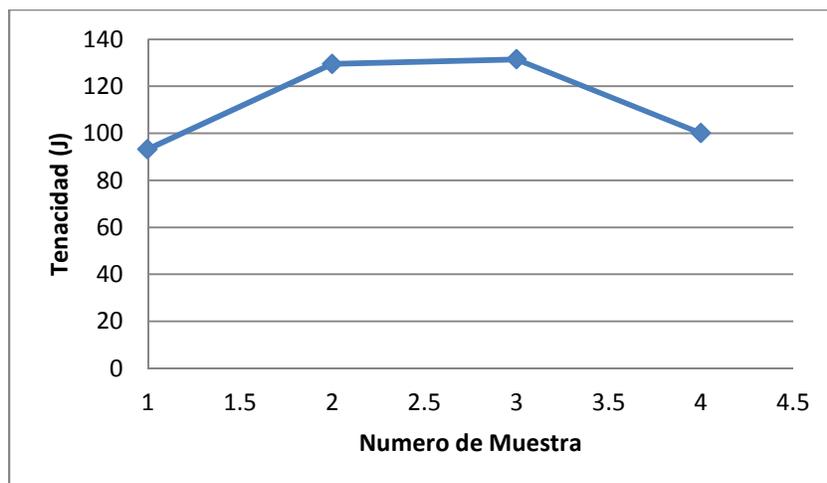


Figura 4.72. Gráfica de dispersión de los resultados del ensayo de impacto para un periodo de exposición de 96 hr.

Al comparar los valores de tenacidad obtenidos para el periodo de 96 hr. son levemente mayores a los obtenidos en el periodo anterior.

Se debe resaltar que el ensayo solo se realizó para cuatro (4) probetas, de las seis (6) pertenecientes a este periodo de exposición, porque dos (2) muestras reflejaron una alta dispersión respecto al grupo de estudio.

#### **4.5.5 Probetas sometidas por un periodo de 196 hr.**

Para este periodo se obtuvo, que al igual que en los periodos anteriores, las muestras fracturaron en la zona soldada donde se encontraba la muesca. Así mismo no se presentó fractura completa del material. Lo anterior se observa en la figura 4.74. Por otro lado, a partir de la figura 4.73, se puede decir que el tipo de fractura obtenida es dúctil.



Tabla 4.73 Fractura de las probetas para el ensayo de impacto para un periodo de exposición de 196hr.

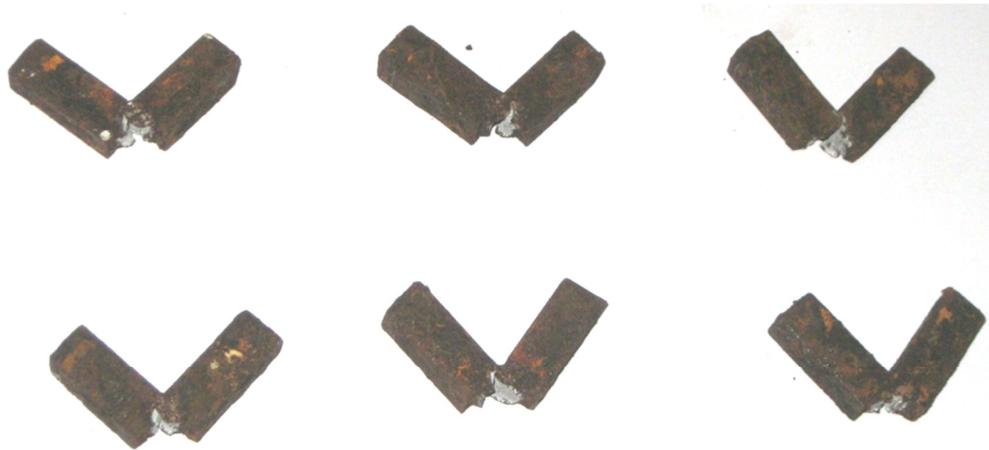


Figura 4.74 Probetas ensayadas para el ensayo de impacto para un periodo de exposición de 196hr.

En la tabla 4.32 se muestran los valores de tenacidad obtenidos para un periodo de exposición de 196hr. En la misma se observa que los valores obtenidos son ligeramente mayores a los valores de tenacidad del periodo de 96hr.

Tabla 4.32 Resultados para el ensayo de impacto para un periodo de 196 hr.

Probeta	1	2	3	4	5	6	Promedio	Desv. Esta	
Angulo	41°	85°	52°	24°	62°	65°	54, 83°	21,04	
Tenacidad	kpm	13.20	9.30	12.20	14.40	11.00	11.40	11.92	1.78
	J	129.49	91.23	119.68	141.26	107.91	111.83	116.90	17.47

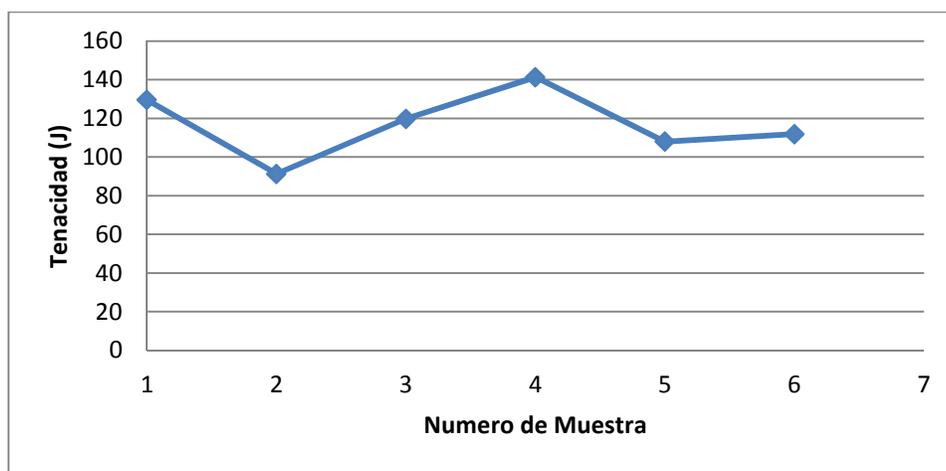


Figura 4.75. Gráfica de dispersión de los resultados del ensayo de impacto para un periodo de exposición de 196 hr.

#### 4.6.4 Análisis de los ensayos de Impacto

En la tabla 4.23 se observan los valores de tenacidad obtenidos en los diferentes periodos de exposición.

Tabla 4.3 Resultados para el ensayo de impacto de los diferentes tiempos de exposición.

Resistencia al Impacto		Muestra patrón	Muestras expuestas a la corrosión		
		0 hr.	48 hr.	96 hr.	196 hr.
Angulo		81,5°	65,83°	57,75°	54, 83°
Tenacidad	Kpm	8,55	10.38	11.58	11.92
	J	83.87	101.86	113.55	116.90

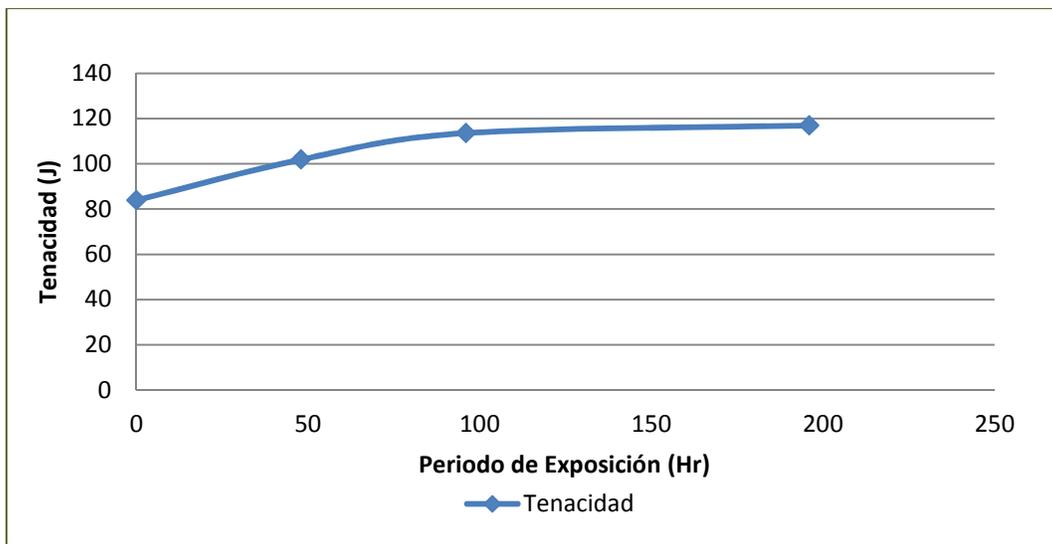


Figura 4.76. Resultados del ensayo de impacto para los diferentes tiempos de exposición.

A partir de la figura 4.76 se puede que:

- El valor de la tenacidad aumenta ligeramente a medida que aumenta el periodo de exposición.
- Se observa que el valor de la tenacidad aumenta para un periodo de 48 hr., con un porcentaje de 20,63%, para los periodos siguiente esta tendencia se mantuvo, pero en con un menor aumento; esto se puede asociar a la microestructura del material, ya que la perlita fina

disgragada presente en el cordón de soldadura, proporciona un aumento de la tenacidad del material, de igual forma el tamaño de grano pequeño del cordón de soldadura proporciona un aumento en esta propiedad.



# CAPÍTULO 5

## *Conclusiones*

---

---

### 5.1 Conclusiones

- Los periodos de exposición seleccionados (48hr, 96hr y 196hr respetivamente) fueron muy cortos para evidenciar los efectos de la corrosión.
- El proceso de soldadura realizado para la unión de las láminas del acero A283 GR B, se realizó de manera correcta, según el procedimiento de soldadura (EPS/WPS) N°D140302017 de la empresa PEQUIVEN.
- Las propiedades mecánicas obtenidas durante los ensayos de tracción y dureza, para las probetas antes y después de ser sometidas a la cámara salina no variaron significativamente por el efecto de la corrosión.
- La tenacidad del material presento un aumento a medida que los periodo de exposición aumentaron.
- De acuerdo a los ensayos metalograficos el cordón de soldadura no se afectó en los ensayos de la cámara de niebla salina, donde se evidenció que la microestructura no presentó ninguna variación, sino las promovidas por el efecto de la soldadura.

## 5.2 Recomendaciones

- Por otro lado se recomienda aumentar el periodo de exposición de las muestras a la cámara salina, por un periodo mayor de 196 hr. La norma B 117 – 07a, ensayo de la cámara salina, explica que no siempre es predecible el comportamiento de los resultados por extrapolación, a menos que, se haya llevado a cabo el ensayo por un periodo suficientemente largo. En el presente trabajo se muestra como el comportamiento de las propiedades obtenidas para los ensayos mecánicos varia al aumentar el tiempo de exposición, sin embargo, para realizar conclusiones de periodos más extensos es necesario tener más información. Así mismo los efectos de la corrosión, macroscópicamente, se observaron, en las adyacencias de la superficie de las muestras, por lo que es recomendable estudiar el comportamiento de los especímenes soldados, bajo mayores efectos de la corrosión.
- Es recomendable incluir en el estudio de los efectos de la corrosión sobre las juntas soldadas, el ensayo de doblado, para determinar el comportamiento de la junta a flexión o esfuerzo de doblado luego de ser sometida al ambiente corrosivo; y así evaluar la ductilidad. Lo anterior con la finalidad de reforzar alguna de sus funciones y conocer hasta qué punto se puede trabajar el material soldado bajo estas condiciones.
- Por último es recomendable, debido al corto periodo de exposición, aumentar la concentración de la solución salina utilizada en la Cámara de niebla Salina, para así acelerar los efectos de la corrosión.

# *Referencias*

---

- 
- ASTM A 283/ A283 M-03 (2002) “Standard Specification for low and intermediate tensile strength carbon steel plates”
- ASTM E3-01 (2002) “Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens”
- ASTM E 8M-04 (2002) “Standard Test Methods of Tension Testing of metallic materials”
- ASTM E 23-02a (2002) “Standard Test Methods for Notched bar impact testing of metallic Materials”
- ASTM E 92-82 (2002) “Standard Test Methods of Vickers Hardnes of metallic Material”
- ASTM Handbook. (1987) “Volume 13, Corrosion” ASTM International
- ASTM Handbook. (1993) “Volume 6, Welding Brazind and Soldering” ASTM International
- ASTM Handbook. (1985) “Volume 13, Metallography and Microstructures ” ASTM International

- E. Zumelzu, C. Cabezas (1996). "Study on welding such dissimilar materials as AISI 304 stainless steel and DHP copper in a sea-water environment. Influence of weld metals on corrosion". *Materials & Design*. ELSEVIER. Turkey. Vol. 57, pag: 249-252.
- M. Dorta Almenara, A. Rosales, J. Vidal, P. Muñoz, M. Payares. (2009) "Influencia de soldaduras SAW sobre la resistencia a la corrosión de aceros dúplex SAF 2205". *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*. S1: 289-296.
- S. Rivero, B. Chico, D. de la Fuente y M. Morcillo. (2007) "Corrosión atmosférica del acero bajo en carbono en un ambiente marino polar. Estudio del efecto del régimen de viento". *Revista de Metalurgia*. 43 (5)
- L. Esquivel (2009). "Proceso de soldadura por el metodo de Resistencia para la manufactura de chasis en la industria automotriz. Instituto Politécnico Nacional, México D.F, p.p 1-8
- C. Arias, E. Calvo y J. Ochoa (2007) "Diseño y Construcción de una cámara de Niebla Salina para ensayos de Corrosión". *Universidad Tecnológica de Pereira. Scientia et Technica Año XIII, No 36*.
- *Manual de Soldadura EXSA-OERLIKON*. Edicion 2000. Lima, p.p 22-33
- *Soldadura TIG, Sunarc*. Polígono Industrial Can Sedó. Esparreguera. p.p 3-8
- E.P DeGarmo; J.T. Black; R. A Kohser (2007), *Materiales y Procesos de fabricación*, 10ma. Edición, Editorial Wiley.
- *American Welding Society (2004) "Manual de Soldadura"*. 4ta Edición. Editorial Pearson.
- W. Smith y J. Hashemi. (2004) "Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales. Editorial: Mac Graw Hill. Cuarta Edición.
- I. Uzcategui (2008)"Corrosión" Universidad de Carabobo.
- L. Bilurbina, F. Liesa y J. Iribarren (2003) "Corrosión y Protección" Ediciones UCP, Primera edición.

- S. Karpakjian y S. Schmid (2008) "Manufactura, ingeniería y tecnología"  
Pearson Educación de México Cuarta edición.