



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



EVALUACIÓN DE LAS UNIONES SOLDADAS REALIZADAS
CON EL PROCESO DE SOLDADURA POR ARCO
ELÉCTRICO DEL ACERO AISI 201 EXPUESTAS A
AMBIENTES MARINOS

Ortega Cortez, Jesús Rafael

Muñoz, Héctor Javier

Naguanagua, Junio de 2011



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



EVALUACIÓN DE LAS UNIONES SOLDADAS REALIZADAS CON EL PROCESO DE SOLDADURA POR ARCO ELÉCTRICO DEL ACERO AISI 201 EXPUESTAS A AMBIENTES MARINOS

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

Tutor académico:

Nombre del Tutor. *Ing. Luis Sidorovas*

Autores:

Ortega Cortez, Jesús Rafael

Muñoz, Héctor Javier

Naguanagua, Junio de 2011



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



EVALUACIÓN DE LAS UNIONES SOLDADAS
REALIZADAS CON EL PROCESO DE SOLDADURA POR
ARCO ELÉCTRICO DEL ACERO AISI 201 EXPUESTAS
A AMBIENTES MARINOS

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

Ortega Cortez, Jesús Rafael

Muñoz, Héctor Javier

Naguanagua, Junio de 2011



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



Certificado de Aprobación

Los abajo firmantes, miembros del jurado designado para evaluar el Trabajo Especial de Grado titulado **“EVALUACIÓN DE LAS UNIONES SOLDADAS REALIZADAS CON EL PROCESO DE SOLDADURA POR ARCO ELÉCTRICO DEL ACERO AISI 201 EXPUESTAS A AMBIENTES MARINOS”**, realizado por los bachilleres: Héctor J. Muñoz.; CI: 18.070.391 y Jesús R. Ortega C.; CI: 16.976.905, hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo.

Ing. Luis Sidorovas.

TUTOR

Ing. Franklin Camejo.

JURADO

Ing. Carmelo Torres.

JURADO

Naguanagua, Mayo de 2011

Dedicatoria

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

A mis padres adoptivos Yecenia Garcias y Néstor Yépez, por ser mis pilares y ejemplo a seguir en los momentos difíciles. Por ser el faro que guio mis paso a la tierra de éxito, con confianza en mí mismo. Por tener la paciencia y amor para regalarme los consejos que hoy me permiten alcanzar tan preciada meta.

A mí gran amor Bella La Rosa Yépez, por su paciencia y tolerancia durante estos largos y difíciles años, por tu apoyo incondicional en las buenas y en las malas. Por tu dulzura, amor y tantos momentos de tristeza y alegría que compartimos juntos. Gracias por ser mi novia.

A la profesora Naykiavick Rangel, por haberme acompañado durante todo este camino; con su cariño, alegría y apoyo incondicional. Por sus consejos y amistad.

A mis amigos Filomenences y Jesús Ortega, quienes con su amistad, sus consejos, solidaridad y ayuda, acortaron el camino y lo hicieron menos duro. Por estar ahí siempre, en los momentos buenos y malos.

A todo aquél que por mi se alegre.

Héctor Javier Muñoz

Dedicatoria

Este trabajo de investigación va dedicado en primer lugar a Dios por guiarme por el sendero de la vida con voluntad, entusiasmo y valentía, y en segundo lugar pero aun mas importante, a la persona que con su paciencia, constancia y perseverancia, además claro está, a su ayuda económica, permitió que el presente proyecto, que comenzó como una idea, se hiciese realidad y quien más que el ser que me tuvo 9 meses en su vientre y me permitió nacer: Mi Madre, la Sra. Carmen Emilia Cortez Bolívar.

A mi hermana Karelys Pérez, por darme fortaleza para poder culminar mi carrera.

A mis antiguos compañeros de clases Miguel Díaz e Isaac Volcán que no pudieron culminar la carrera y que ahora puedo decirles con toda confianza y seguridad que: Si se podía, así como también a los compañeros que seguimos juntos en el transcurso de la carrera entre los que puedo nombrar a Betsy Torres, Erick Sayago y Arnold Camacho.

A mi estimado amigo Christopher Sánchez por su apoyo en los momentos en los lo necesite, así como a toda la familia Sánchez por su hospitalidad. A todas aquellas personas que en algún momento de la carrera me albergaron en su casa.

Y por último a mi compañero de tesis Héctor Muñoz, por acompañarme en esta ardua labor de terminar nuestro trabajo de grado.

Jesús Rafael Ortega Cortez.

Agradecimientos

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

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

Al profesor Luis Sidorovas, por brindarnos parte de su tiempo para la realización de este trabajo.

Al profesor Francisco Delfino, por brindarnos apoyo técnico para la realización de este trabajo.

Al personal docente y administrativo del departamento de materiales, por su colaboración.

A los profesores Franklin Camejo y Carmelo Torres por su colaboración, apoyo y ayuda.

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

Héctor Muñoz y Jesús Ortega

Evaluación de las uniones soldadas realizadas con el proceso de soldadura por arco eléctrico del acero AISI 201 expuestas a ambientes marinos.

Resumen.

La demanda de aceros inoxidable ha venido aumentando a medida que se ha descubierto la amplia gama de aplicaciones en la que este tipo de material se utiliza, por lo que ha surgido la necesidad de reducir costos tanto para su fabricación como para su conformado y utilización estructural por lo que en este trabajo de investigación se plantea en primer lugar la caracterización del acero austenítico AISI 201 debido a que posee menor contenido de Níquel y por ende menos costoso que los aceros utilizados actualmente lo que hace más rentable su adquisición y/o utilización; y en segundo plano se plantea la evaluación del comportamiento de las juntas soldadas de este material bajo el proceso de soldadura SMAW que por su simplicidad y practicidad es uno de los procesos de soldadura de más bajo costo. En el estudio de las juntas soldadas se realizó ensayos de tracción y doblado a probetas que fueron expuestas previamente al ensayo de corrosión mediante niebla salina para obtener sus propiedades mecánicas y de esta manera su comportamiento con respecto al efecto corrosivo. Fue notable el efecto negativo que tuvo la exposición sobre los esfuerzos que resiste el material así como sobre en sus propiedades elásticas percibiéndose en mayor medida en las probetas que fueron sometidas a 336 horas de exposición. La corrosión estuvo localizada en el cordón de soldadura por lo que su efecto no fue significativo en la microestructura del material base, la cual es austenítica, caracterizada por granos equiaxiales, microestructura que es característica de este tipo de aceros. Los resultados obtenidos fueron en su mayoría los esperados para las especificaciones del material en estudio y los criterios y condiciones definidos previamente en el trabajo de investigación.

Índice General

| | |
|--|----------|
| Índice General | i |
| Índice de Figuras | iv |
| Índice de Tablas | vii |
| Resumen | ix |
| Listado de variables | x |
| CAPÍTULO 1 El Problema | 1 |
| 1.1 Situación problemática | 1 |
| 1.2 Objetivos | 2 |
| 1.2.1 <i>Objetivo General</i> | 2 |
| 1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i> | 2 |
| 1.3 Justificación | 3 |
| 1.4 Limitaciones | 3 |
| 1.5 Alcance | 4 |
| CAPÍTULO 2 Marco Teórico | 5 |
| 2.1 Antecedentes | 5 |
| 2.2 Aceros al carbono | 7 |
| 2.2.1 <i>Definición</i> | 7 |
| 2.2.2 <i>Clasificación de los aceros</i> | 7 |
| 2.2.3 <i>Denominación de los aceros</i> | 12 |
| 2.2.4 <i>Propiedades de los aceros</i> | 13 |
| 2.2.5 <i>Material en estudio (AISI 201)</i> | 23 |
| 2.3 Procesos de Soldadura | 26 |
| 2.3.1 <i>Definición</i> | 26 |
| 2.3.2 <i>Clasificación general de los tipos de soldadura</i> | 26 |
| 2.3.3 <i>Soldadura por arco eléctrico</i> | 27 |
| 2.4 Soldadura metálica con arco eléctrico protegido (SMAW) | 29 |
| 2.4.1 <i>Introducción Histórica</i> | 29 |
| 2.4.2 <i>Descripción Preliminar</i> | 29 |
| 2.4.3 <i>Equipo Básico para la soldadura SMAW</i> | 30 |

| | | |
|--|---|-----------|
| 2.4.4 Selección del electrodo | 31 | |
| 2.5 Corrosión | 33 | |
| 2.5.1 Mecanismos Electroquímicos de la Corrosión | 36 | |
| 2.5.2 Definición de Ánodo y Cátodo | 37 | |
| 2.5.3 Efecto de la Temperatura | 38 | |
| 2.5.4 Efecto del pH | 39 | |
| 2.5.5 Clasificación de la Corrosión | 40 | |
| | | |
| CAPÍTULO 3 | Metodología | 47 |
| | | |
| 3.1 Nivel de la Investigación | 47 | |
| 3.2 Diseño de la Investigación | 47 | |
| 3.3 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos | 48 | |
| 3.4 Técnicas de Procesamiento de Datos | 48 | |
| 3.5 Adquisición del material de estudio | 48 | |
| 3.6 Elaboración de las probetas | 49 | |
| 3.6.1 Diseño y realización del corte del material de estudio | 49 | |
| 3.6.2 Proceso de elaboración de las juntas soldadas | 50 | |
| 3.6.3 Elaboración de las probetas de tracción | 53 | |
| 3.6.4 Elaboración de las probetas de doblado | 54 | |
| | | |
| 3.7 Procedimientos Experimentales | 55 | |
| 3.7.1 Ensayo de Corrosión | 55 | |
| 3.7.2 Ensayo de Tracción | 57 | |
| 3.7.3 Ensayo de doblado en “U” | 60 | |
| 3.7.4 Ensayo de doblado al aire | 61 | |
| 3.7.5 Ensayo de metalografía | 63 | |
| 3.7.6 Análisis de los Datos Obtenidos | 65 | |
| | | |
| CAPÍTULO 4 | Resultados experimentales y sus respectivos análisis | 66 |
| | | |
| 4.1 Caracterización del material en estudio | 66 | |
| 4.1.1 Propiedades mecánicas | 66 | |
| 4.1.2 Caracterización Metalográfica | 70 | |
| 4.1.3 Tamaño de grano | 72 | |
| 4.2 Caracterización de las juntas soldadas | 72 | |
| 4.2.1 Propiedades mecánicas | 72 | |
| 4.2.2 Caracterización Metalográfica | 74 | |
| 4.2.3 Tamaño de grano | 75 | |
| 4.3 Evaluación del efecto de la corrosión en las juntas soldadas mediante el ensayo de tracción | 76 | |
| 4.3.1 Probetas soldadas expuestas a corrosión por un periodo de 48 horas. | 77 | |
| 4.3.2 Probetas soldadas expuestas a corrosión por un | | |

| | |
|---|-----------|
| <i>periodo de 96 horas.</i> | 77 |
| 4.3.3 Probetas soldadas expuestas a corrosión por un periodo de 168 horas. | 78 |
| 4.3.4 Probetas soldadas expuestas a corrosión por un periodo de 336 horas. | 79 |
| 4.4 Evaluación del efecto de la corrosión mediante el ensayo de doblado | 83 |
| 4.4.1 Ensayo de doblado en “U” | 83 |
| 4.4.2 Ensayo de doblado al aire | 85 |
| CAPÍTULO 5 Conclusiones y Recomendaciones | 88 |
| 5.1 Conclusiones | 88 |
| 5.1 Recomendaciones | 90 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 91 |
| ANEXOS | 94 |
| Especificaciones del proceso de soldadura | 95 |

Índice de Tablas

| Tabla. | Pág. |
|---|-------------|
| 2.1. Valores del factor empírico de doblado kb. | 21 |
| 2.2. Composición Química del AISI 201. | 23 |
| 2.3. Propiedades Físicas del acero 201. | 24 |
| 2.4. Propiedades mecánicas del AISI 201. | 24 |
| 2.5. Propiedades térmicas del AISI 201. | 25 |
| 2.6. Designación AWS de electrodos para distintos materiales. | 32 |
| 3.1. Características de la Máquina de soldar utilizada. | 51 |
| 3.2. Características de la cámara de niebla salina. | 55 |
| 4.1 Valores característicos de cada probeta sin soldadura. | 68 |
| 4.2. Propiedades mecánicas del material en estudio. | 70 |
| 4.3. Valores característicos de cada probeta soldada. | 73 |
| 4.4. Propiedades mecánicas de las probetas soldadas. | 73 |
| 4.5. Valores característicos de cada probeta soldada sometida a corrosión por 48 horas. | 77 |
| 4.6. Propiedades mecánicas de las probetas soldadas expuestas a corrosión por 48 horas. | 77 |
| 4.7. Valores característicos de cada probeta soldada sometida a corrosión por 96 horas. | 78 |
| 4.8. Propiedades mecánicas de las probetas soldadas expuestas a corrosión por 96 horas. | 78 |
| 4.9. Valores característicos de cada probeta soldada sometida a corrosión por 168 horas. | 79 |

| | |
|--|-----------|
| 4.10. Propiedades mecánicas de las probetas soldadas expuestas a corrosión por 168 horas. | 79 |
| 4.11. Valores característicos de cada probeta soldada sometida a corrosión por 336 horas. | 80 |
| 4.12. Propiedades mecánicas de las probetas soldadas expuestas a corrosión por 336 horas. | 80 |
| 4.13. Resultados del ensayo de doblado en “U”. | 84 |
| 4.14. valores de K y n. Ley de Hollomon | 86 |
| 4.15. Resultados de ensayo de doblado al aire. | 87 |

Índice de Figuras

| Figura. | Pág. |
|---|-------------|
| 2.1. Montaje de la probeta en el ensayo de tracción. | 15 |
| 2.2. Diagrama esfuerzo-deformación típico de un material metálico. | 16 |
| 2.3. Soldadura por Arco Eléctrico. | 27 |
| 2.4. Soldadura Con electrodo refractario (método TIG). | 28 |
| 2.5. Soldadura Con electrodo consumible (método MIG y MAG). | 29 |
| 2.6. Máquina para soldar Lincoln. | 30 |
| 2.7. Ciclo que sigue el hierro hasta volver a su estado estable. | 36 |
| 2.8. Corrosión uniforme. | 41 |
| 2.9. Corrosión galvánica. | 41 |
| 2.10. Corrosión por grietas. | 42 |
| 2.11. Corrosión por picaduras. | 43 |
| 2.12. Corrosión intergranular. | 44 |
| 2.13. Corrosión por erosión. | 44 |
| 2.14. Corrosión por tensión. | 45 |
| 2.15. Corrosión salina. | 46 |
| 3.1. Tiras para la fabricación de probetas de tracción. | 49 |
| 3.2. Tiras para la fabricación de probetas de doblado. | 50 |
| 3.3. Máquina para soldar Lincoln Ac 225. | 51 |
| 3.4. Técnica a utilizar para realizar la soldadura. | 53 |

| | |
|--|-----------|
| 3.5. Dimensiones para las probetas de tracción. | 54 |
| 3.6. Dimensiones para las probetas de doblado y metalografía. | 54 |
| 3.7. Cámara de niebla salina para ensayos de corrosión. | 55 |
| 3.8. Máquina Universal de Ensayos Mecánicos utilizada. | 58 |
| 3.9. Punzón para doblado. | 60 |
| 3.10. Ensayo de doblado al aire. | 62 |
| 3.11. Máquina de desbaste y pulido | 63 |
| 3.11. Microscópico electrónico. | 64 |
| 4.1. Diagrama esfuerzo-deformación promedio de las probetas sin soldadura. | 67 |
| 4.2. Línea de tendencia de la zona plástica del diagrama esfuerzo-deformación promedio de la probeta sin soldadura. | 67 |
| 4.3. Muestras observadas por microscopia óptica a 200X. | 70 |
| 4.4. Muestras observadas por microscopia óptica a 400X. | 71 |
| 4.5. Muestras observadas por microscopia óptica a 1000X. | 71 |
| 4.6. Muestras observadas por microscopia óptica a 100X. | 72 |
| 4.7. Diagrama esfuerzo-deformación promedio de las probetas soldadas. | 73 |
| 4.8. Cordón de soldadura observado por microscopia óptica a 200X. | 74 |
| 4.9. Ferrita proeutectoide observada por microscopia óptica a 100X. | 75 |
| 4.10. Línea de fusión observada por microscopia óptica a 200X. | 75 |
| 4.11. Variación del tamaño de grano observada por microscopia óptica a 100X. | 76 |
| 4.12. Diagrama esfuerzo-deformación promedio de las probetas soldadas sometidas a corrosión por 48 horas. | 76 |

| | |
|---|-----------|
| 4.13. Diagrama esfuerzo-deformación promedio de las probetas soldadas sometidas a corrosión por 96 horas. | 77 |
| 4.14. Diagrama esfuerzo-deformación promedio de las probetas soldadas sometidas a corrosión por 168 horas. | 78 |
| 4.15. Diagrama esfuerzo-deformación promedio de las probetas soldadas sometidas a corrosión por 336 horas. | 79 |
| 4.16. Diagrama esfuerzo de Fluencia-periodo de exposición. | 81 |
| 4.17. Diagrama esfuerzo de Tracción-periodo de exposición. | 81 |
| 4.18. Diagrama esfuerzo de Ruptura-periodo de exposición. | 82 |
| 4.19. Diagrama % deformación-periodo de exposición. | 82 |
| 4.20. Probeta expuesta a corrosión durante 48 horas, doblada en “U”. | 83 |
| 4.21. Probeta expuesta a corrosión durante 96 horas, doblada en “U”. | 83 |
| 4.22. Probeta expuesta a corrosión durante 168 horas, doblada en “U”. | 83 |
| 4.23. Probeta expuesta a corrosión durante 336 horas, doblada en “U”. | 84 |
| 4.24. Representación en escala bi-logarítmica de la curva esfuerzo-deformación verdadera. | 86 |

CAPÍTULO 1

El Problema

1.1. Situación problemática.

El desarrollo sistemático de las zonas costeras por razones turísticas, habitacionales y también industriales está directamente relacionado con el progreso de estas regiones. Esto conlleva a una selección más exigente de materiales en los diseños para compensar los factores ambientales que aceleran el deterioro de dichos materiales utilizados en los diferentes elementos y estructuras. Dentro de los materiales más utilizados están los aceros inoxidable austeníticos de la serie 300 como AISI 301 y AISI 304, debido a que poseen una óptima resistencia a la corrosión, una excelente soldabilidad y buen conformado. La principal preocupación sobre estos aceros es su contenido en níquel debido al alto costo de este material lo que ha dado lugar a la búsqueda de alternativas con bajos contenidos en níquel, que sean capaces de satisfacer los requerimientos mecánicos y de resistencia a la corrosión necesarios para estas estructuras teniendo como resultado la fabricación del acero austenítico AISI 201 que por presentar gran resistencia a una amplia variedad de corrosiones medias y moderadas se usa en muchas aplicaciones en las que los aceros AISI-301 y 304 eran tradicionalmente los elegidas. Por otro lado es relativamente económico comparado con las calidades anteriormente nombradas presentando un conformado y soldabilidad excelentes.

Las estructuras anteriormente citadas, por lo general, son construidas mediante sistemas de fijación como bridas, pernos, tuercas o más comúnmente

mediante soldadura (proceso de unión de materiales en el cual se funden las superficies de contacto de dos o más partes mediante la aplicación conveniente de calor o presión).

Por lo antes expuesto se requiere evaluar las juntas soldadas del acero AISI 201 expuestas a los efectos corrosivos del ambiente costero para determinar la posibilidad de sustitución del AISI 304 en gran parte de sus aplicaciones y ampliar su utilización en el campo comercial.

1.2 Objetivos.

1.2.1 Objetivo General.

Evaluar las uniones soldadas realizadas con el proceso de soldadura por arco eléctrico del acero AISI 201 expuestas a ambientes marinos.

1.2.2 Objetivos Específicos.

- Caracterizar el acero AISI 201 desde el punto de vista de sus propiedades mecánicas y observación microscópica.
- Determinar las propiedades mecánicas y metalográficas de las juntas soldadas del acero AISI 201 por el proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodos revestidos.
- Evaluar la corrosión de las juntas soldadas del acero AISI 201 producida por el ensayo de niebla salina según la norma ASTM B117 – 07 mediante el ensayo de tracción.
- Realizar la evaluación del efecto de la corrosión en las juntas soldadas mediante el ensayo de doblado.
- Estudiar la microestructura del material AISI 201 afectado por el fenómeno de corrosión.

1.3 Justificación.

Cuando se hace referencia a estructuras que se construyen de forma masiva, como el caso de escaleras y ascensores, la rentabilidad es un factor determinante por lo que el estudio de los materiales utilizados en dichas estructuras debe estar enfocado en base a la disminución de costos. Estas estructuras por lo general requieren de suficiente material para su elaboración, por lo que el uso de materiales que cuenten con propiedades similares a los usados actualmente y que a su vez, sean de bajo costo, es un tema de profundo interés; No solo en el ámbito de la construcción de estructuras costeras si no en cualquier campo de carácter comercial o industrial donde se puedan apreciar beneficios económicos.

Dado que el material en estudio existe en el mercado venezolano y aunado al hecho que se cuenta con escasa información acerca de dicho material, su estudio aportaría material de referencia para quienes lo necesiten a futuro. Además se pretende promover el estudio de los aceros recientemente incluidos en el mercado venezolano para abrir paso a un frente experimental y de investigación que permita el desarrollo tecnológico en Venezuela.

1.4 Limitaciones.

- La posibilidad de desarrollar el trabajo de investigación y cubrir los objetivos planteados en un tiempo igual a 3 períodos lectivos como máximo.
- Las horas de disponibilidad de las máquinas y requerimientos técnicos del laboratorio de materiales.

1.5 Alcance.

El estudio comprenderá en primer lugar la realización del ensayo de niebla salina de las probetas previamente soldadas mediante el proceso de arco eléctrico. Estas probetas van a estar sometidas a una concentración del 5% de cloruro de sodio según especificaciones de la norma ASTM B 117. Los tiempos de exposición de las probetas no excederán en ningún caso el período requerido para la realización de los ensayos normalizados de corrosión. Las probetas sometidas a corrosión se someterán posteriormente a ensayos de tracción, doblado y metalografía.

CAPÍTULO 2

Marco Teórico

Antes de explicar desde un punto de vista teórico los requerimientos técnicos y los fundamentos experimentales que se usaran en esta investigación se hará referencia a estudios previos que darán una idea de los resultados que se han obtenido en este ámbito.

2.1. ANTECEDENTES.

La formación de fases sensibles en la soldadura de aceros inoxidable ha exigido el desarrollo de nuevos aceros que sean más resistentes a la corrosión pero al mismo tiempo conserven sus propiedades mecánicas por lo que **Ramón Cortez** y **Jaime Villanueva**, entre otros, en el año **2004** decidieron realizar un estudio de la soldabilidad del acero AISI 904L que es de carácter austenítico y por ser de última generación no cuenta con antecedentes de soldabilidad debido al poco tiempo que tiene en los mercados internacionales. Su estudio verifica la soldabilidad de este material determinando los electrodos comerciales más adecuados para evitar la formación de la fase sigma que produce estructuras cristalinas altamente sensibles a los agentes corrosivos y de esta manera poder ampliar el uso industrial de este acero.

En su estudio en el año **2004**, **Terán y Tovar** entre otros, caracterizaron la microestructura del acero 304 mediante microscopía óptica de barrido para observar los efectos corrosivos. Las probetas después de haber sido soldadas mediante los procesos de soldadura GMAW, GTAW Y SMAW se someten a un ambiente de corrosión similar al de los sistemas de

escape de los vehículos automotores. Finalmente demostraron la existencia del efecto corrosivo en la interfase entre el material base y de aporte.

En inspecciones realizadas en el 2004 a la estructura del muelle “El Progreso” construido en la península de Yucatán, se observó la presencia de barras de acero inoxidable 304, mostrando éstas signos de corrosión principalmente en los ganchos. Es común que el acero inoxidable tenga problemas de corrosión bajo esfuerzo de tensión y compresión tomando en cuenta la presencia de cloruros. Además, durante las inspecciones realizadas al muelle, se determinaron concentraciones de cloruros de hasta el 2% por peso del concreto, a la profundidad de la barra de refuerzo (10 cm.), lo que hace suponer que el acero inoxidable en esta construcción es susceptible a la corrosión. Por consiguiente, se estudio en el año **2006** por parte de **Torres A. y Pérez J.**, entre otros, el comportamiento de dichas barras con esfuerzos residuales con barras rectas sin esfuerzo aplicado alguno determinándose las propiedades físicas y químicas de dichos materiales bajo las condiciones anteriormente nombradas.

La gran utilización de aceros en aplicaciones marinas ha exigido la necesidad de realizar una comparación del comportamiento frente a la corrosión húmeda de diferentes aceros inoxidables y aportar mayor información acerca del comportamiento real de estos materiales en servicio mediante la realización de ensayos electroquímicos, y analizar el comportamiento frente a corrosión de las uniones obtenidas con estos materiales mediante el proceso de arco eléctrico AW. Debido a esto **Vásquez A., Sánchez A. y Novoa X.** en el **2008** tuvieron como objeto de estudio el material de referencia AISI 304 y aceros inoxidables con bajos contenidos en níquel. Estos últimos son los aceros inoxidables ferríticos AISI 444 y AISI 430,

el acero inoxidable austenítico al cromo-manganeso AISI 201, y los aceros inoxidables dúplex SAF 2304 y SAF 2205. La técnica empleada para el estudio de su comportamiento frente a la corrosión húmeda fue mediante la comparación de parámetros como el potencial de picaduras (E_p). Para analizar el comportamiento de las uniones se emplearon ensayos de corrosión acelerada, así como Microscopía Óptica y Microscopía Electrónica de Barrido.

En todo proceso de soldadura se deben tomar en cuenta los parámetros intensidad, voltaje y velocidad de avance y establecer varias condiciones de energía de entradas para de esta manera poder clasificar la soldadura adecuada para cada proceso. A cada grupo que se clasifica se le debe hacer un ensayo metalográfico para determinar la microestructura de cada cordón y hasta qué punto resiste a la corrosión

2.2. ACEROS AL CARBONO.

Como este estudio tiene como finalidad el análisis de juntas soldadas cuyo material base es un acero, a continuación se dará una breve descripción de los mismos.

2.2.1. Definición.

Generalmente se consideran aceros al carbono aquellos con un contenido de carbono de 0,02 a 2,11%. La mayoría de los aceros contienen pequeñas cantidades de manganeso (hasta 0,9%) y de silicio (hasta 0,3%) y la función de estos elementos es actuar como desoxidantes, combinándose con el oxígeno y el azufre reduciendo los efectos perjudiciales de éstos.

2.2.2. Clasificación de los aceros.

La clasificación del acero se puede determinar en función de sus características; las más conocidas son la clasificación del acero por su composición química y por sus propiedades o clasificación del acero por su uso; cada una de estas clasificaciones tiene una sub-clasificación que se describe a continuación:

- Clasificación del acero según su composición química: Acero al carbono como se explicó anteriormente, se trata del tipo básico de acero que contiene menos del 3% de elementos distintos al hierro y al carbono. Entre ellos pueden clasificar los siguientes:

- Acero de alto porcentaje de carbono: Acero al carbono que contiene más del 0,5% de carbono en su composición química. También denominados aceros duros con un porcentaje de carbono de 0,6 a 0,8% y extra duros con un porcentaje de carbono mayor al 0,8%.

- Acero de bajo carbono. Acero al carbono que contiene menos de 0,3% de carbono. Dichos aceros son denominados Extra suaves y suaves.

- Acero de mediano carbono: Acero al carbono que contiene entre 0,3 y 0,5% de carbono. Entre ellos se pueden nombrar los aceros semisuaves y semiduros.

- Acero de aleación: Acero que contiene otro metal que fue añadido intencionalmente con el fin de mejorar ciertas propiedades del metal.

- Clasificación del Acero en función de su uso:
 - Acero para herramientas: diseñado para tener alta resistencia al desgaste, tenacidad y fuerza; en general el contenido de carbono debe ser superior a 0,30%, pero en ocasiones también se usan aceros con un contenido de carbono más bajo (0,1 a 0,30%) para la fabricación de ciertas herramientas.
 - Acero estructural: es el acero que se emplea en la industria de la construcción, bien puede ser el acero de refuerzo en las armaduras para estructuras de hormigón, el acero estructural para estructuras metálicas.

- Clasificación del acero según sus propiedades:
 - Aceros especiales.
 - Aceros de Baja Aleación Ultra-resistentes.
 - Acero Galvanizado: son láminas o pletinas de acero revestidas con Zinc. Su composición química es la siguiente: 0,15% Carbono, 0,60% Manganeso, 0,03% Potasio, 0,035% Azufre.
 - Aceros inoxidables: Es un acero aleado que debe contener al menos un 12% de Cromo y dependiendo de los agentes exteriores corrosivos a los que va a estar expuesto debe contener otros elementos como el Níquel, el molibdeno y otros. Debido a que presentan composiciones químicas diversas que han sido

desarrolladas de acuerdo con las exigencias específicas de las condiciones de trabajo, su clasificación en algunas ocasiones se torna dificultosa, pero dado que está relacionada íntimamente con el tipo de componentes que el acero posee se ha podido clasificar en base a su estructura en:

Aceros Inoxidables austeníticos: son los más utilizados a nivel industrial compuestos en su mayoría por Cromo, Níquel y Manganeso. Su estructura predominante es la austenita aunque también contienen la fase ferrita pero en menor proporción. El equilibrio de la aleación depende la cantidad de Níquel que contiene lo que le permite mantener su estructura a temperatura ambiente. Debido a su alto contenido de cromo se caracterizan por su excelente resistencia a la corrosión y oxidación.

Aceros inoxidables ferríticos: son aleaciones de Hierro (Fe), Cromo y Carbono (C). Estos aceros tienen la característica común de ser magnéticos y de conservar su estructura ferrítica sin que sea afectada por el tratamiento térmico. La resistencia mecánica de estos aceros es relativamente alta y si son tratados con recocido tienden a ser muy dúctiles.

Aceros inoxidables martensíticos: su nombre se deriva de la presencia de la fase martensita obtenida mediante el tratamiento térmico de temple. Tienen un contenido de 13-17% Cr y de 0.1-1% C. Tanto su estructura como sus propiedades mecánicas pueden ser transformables mediante otros tratamientos térmicos como por ejemplo el

recocido o añadiendo Molibdeno como aleante lo que ayuda a mantener su resistencia a la tracción y su límite de fluencia a temperaturas moderadamente elevadas.

Aceros Dúplex: entre ellos se pueden nombrar los aceros 312, 315, 318 325 y 329. Son aleaciones base Hierro con Cr y Mo, con suficiente cantidad de estabilizadores como Ni y N para lograr el balance entre Ferrita y Austenita. El resultado es una adecuada combinación de estas dos fases, la Austenita confiere ductilidad y la Ferrita resistencia a corrosión galvánica. El Mo hace más resistente a la capa pasivante y mejora la resistencia a la corrosión por picaduras. Los carburos de Cr tienden a precipitar en la interfase Ferrita-Austenita pero obteniendo el Cr de la Ferrita en donde la difusión es más rápida y la homogeneización del Cr en la misma es mayor que si fuese Austenita pura y por lo tanto la disminución de la concentración de Cr en el borde de grano no es tan pronunciada impidiendo la Corrosión Intergranular. Consecuentemente los Aceros Dúplex son usados en las más severas condiciones de temperatura y contenido de cloruros.

Aceros endurecidos por precipitación: Los aceros inoxidables endurecidos por precipitación están clasificados por la UNS por las series 100, 350, 360, 450 y 455. Su uso es muy acotado, el fabricante lo entrega con el tratamiento térmico ya realizado. Los hay de estructura Austenítica, Martensítica y Semi-austenítica. Los Martensíticos y Semi-austeníticos son Austeníticos a alta temperatura. Los Martensíticos templean entre 100°C y

150°C mientras que para los semi-austeníticos se templen de temperaturas menores de 70 °C. En este caso para inducir la transformación Martensítica se puede templear hasta 100°C, deformar plásticamente en frío o calentar entre 650°C y 850°C para precipitar carburos de los aleantes y así disminuir la cantidad de estabilizantes de la fase Austenítica. Son aceros con entre 12% y 18 % de Cr y entre 4 % y 9 % de Ni además de los aleantes que producen el endurecimiento por precipitación que suelen ser Mo, Ti, N, Cu, Al, Ta, Nb, B, y V. Se los utiliza en ciertas aplicaciones a alta temperatura como en intercambiadores de calor y tubos del sobre-calentador de calderas de vapor.

2.2.3. Denominación de los Aceros.

El Instituto Americano del Hierro y Acero (**AISI**, por sus siglas en ingles) tiene un sistema para clasificar aceros inoxidable que se basa en la utilización de un código de 3 dígitos a veces seguido de una o más letras. El primer dígito da una pista de la clase de acero; por ejemplo 2XX y 3XX corresponden a aceros austeníticos. La serie 4XX corresponde a los aceros ferríticos y martensíticos. Las letras del sufijo pueden indicar la presencia de un elemento adicional o alguna característica especial. Existen gran cantidad de aceros que no están en el sistema AISI como por ejemplo algunos aceros dúplex debido a que se designan con nombres propios registrados como por ejemplo el SAF 2507. (**Empresa Turbo-cobre, 2009**)

El acero inoxidable fue inventado por Harry Brearley (1871-1948), quien había comenzado a edad muy temprana a trabajar como operario en la acería de su pueblo natal en Sheffield (Inglaterra). En 1912, Brearley comenzó a

investigar, a petición de los fabricantes de armas la manera de encontrar una aleación que presentara mayor resistencia al desgaste que la utilizada hasta el momento por el interior de los cañones de las pequeñas armas de fuego como resultado del calor despedido por los gases. Buscando un metal que resistiera la erosión, Brearley encontró un metal resistente a la corrosión. Su invento no tuvo mayor interés inmediato y fue destinado a la fabricación de cuberterías. La resistencia a la corrosión proviene de una película de óxido que se forma en la superficie del metal y que contiene notables cantidades de cromo ($\geq 12\%$ Cr).

2.2.4. Propiedades de los aceros.

Entre las propiedades de los aceros se tiene una clasificación primordial que indica el comportamiento de cada uno. Se clasifican en propiedades mecánicas y propiedades térmicas.

Propiedades mecánicas.

- Ductilidad. Es la capacidad que tienen los materiales para sufrir deformaciones a tracción relativamente altas, hasta llegar al punto de fractura.
- Resistencia. Es la oposición al cambio de forma y a las fuerzas externas que pueden presentarse como cargas son tracción, compresión, cizallamiento, flexión y torsión.
- Elasticidad. Corresponde a la capacidad de un cuerpo para recobrar su forma al dejar de actuar la fuerza que lo ha deformado.
- Plasticidad. Es la capacidad de deformación de un metal sin que llegue a romperse. Si la deformación se produce por alargamiento se llama ductilidad y por compresión maleabilidad.

- **Fragilidad.** Es la propiedad que expresa falta de plasticidad y por lo tanto en los metales frágiles su rotura se produce cuando sobrepasa la carga del límite elástico.
- **Resiliencia.** Es la capacidad que presentan los materiales para absorber energía por unidad de volumen en la zona elástica.
- **Tenacidad:** es la capacidad que presentan los materiales para absorber energía por unidad de volumen en la zona plástica; por lo tanto un metal es tenaz si posee cierta capacidad de dilatación.
- **Maquinabilidad.** Es la facilidad que posee un material de permitir el proceso de mecanizado por arranque de viruta.
- **Dureza.** Es la resistencia que ofrece un acero para dejarse penetrar. Se mide en unidades BRINELL (HB) ó unidades ROCKWEL C (HRC), mediante test del mismo nombre.

Propiedades Eléctricas.

Están relacionadas con la capacidad de conducir la corriente eléctrica.

Propiedades Ópticas.

Están referidos a la capacidad que poseen los materiales para reflejar o absorber el calor de acuerdo a las siguientes características: Color, Brillo, o Pulido.

Propiedades Magnéticas.

Están referidas a la capacidad que poseen los materiales metálicos para inducir o ser inducidos por un campo electromagnético.

Las propiedades mecánicas de un acero son relaciones de propiedades más específicas que se determinan mediante una serie de ensayos que permiten estimarla de acuerdo al comportamiento que presente. Entre estos ensayos se pueden citar los siguientes:

Ensayo de tracción.

Es uno de los ensayos más utilizados para determinar la relación existente entre los esfuerzos y las deformaciones en un material que es deformado debido a una carga uniaxial. Dicho ensayo es realizado en un banco de ensayos universal como la que se ilustra en la figura 2.1. Del ensayo de tracción se obtiene la curva carga – alargamiento, a partir de la cual se obtiene la curva **esfuerzo – deformación ingenieril** cuya tendencia se puede apreciar en la figura 2.2, 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 2.1 y 2.2. **(Cabello S.)**

$$S = \frac{F}{A_0} \quad (2.1)$$

$$e = \frac{L_f - L_0}{L_0} \quad (2.2)$$

Donde **S₀** es el esfuerzo ingenieril en MPa, **F** es la carga aplicada en N en el ensayo, **A₀** es el área de la sección transversal inicial de la muestra en mm, **e** la deformación ingenieril, **L** es la longitud entre marcas calibradas instantánea en mm y **L₀** la longitud inicial entre marcas calibradas de la muestra en mm.

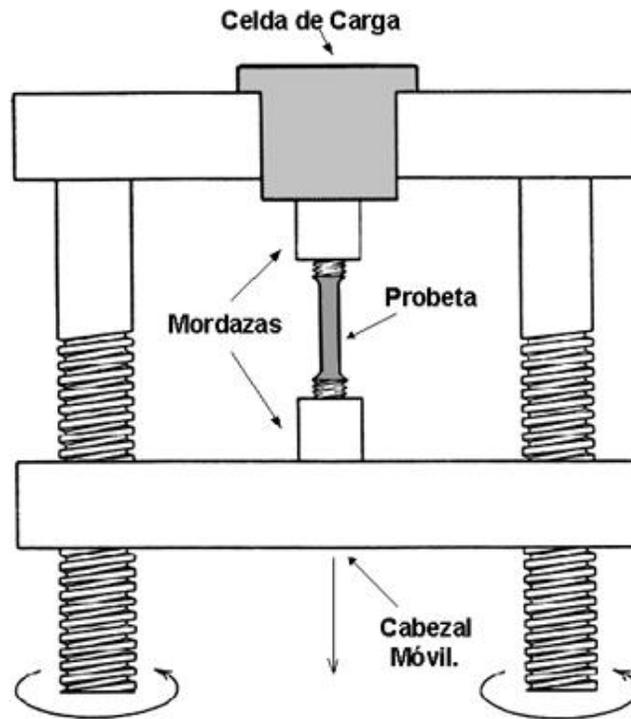


Figura 2.1. Montaje de la probeta en el ensayo de tracción. (Iriza, 2008)

Zona Elástica: El esfuerzo es lineal a la deformación, y el material recobra su longitud inicial si se libera de carga. El comportamiento se rige por la **Ley de Hooke** que expone que el esfuerzo es proporcional al producto de la deformación por el módulo de elasticidad propio de cada material.

Zona Plástica: En esta zona no existe proporcionalidad entre los esfuerzos y las deformaciones, debido a que el material se deforma permanentemente, experimentándose un endurecimiento por deformación. La transición elasto- plástica está marcada por el punto de fluencia. El esfuerzo para el cual ocurre la deformación permanente del material se conoce como **resistencia a la fluencia (S_y)**, y es un valor característico del material.

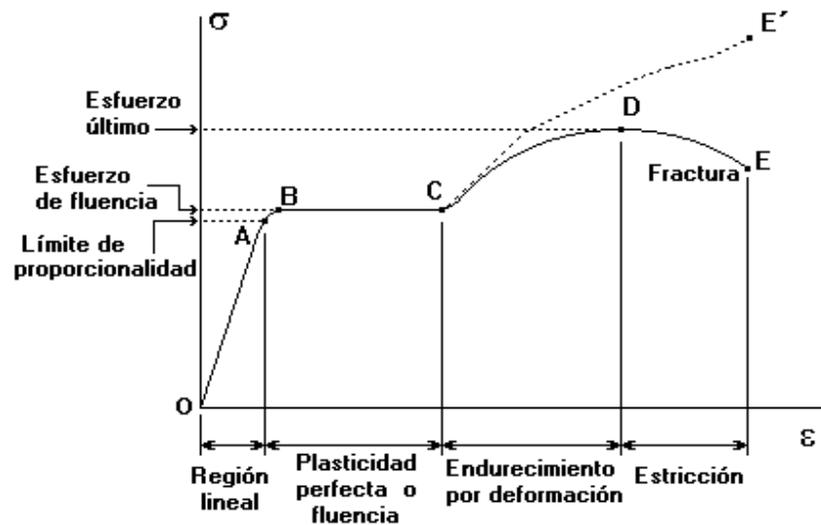


Fig. 2.2. Diagrama esfuerzo-deformación típico de un material metálico.

(Iriza, 2008)

El esfuerzo de fluencia puede identificarse en la curva por el cambio en la pendiente, al final de la región lineal, pero existen materiales en los que no se pueden detectar fácilmente; entonces se define como el “esfuerzo que produce una desviación del 0,2% con respecto a la línea recta”.

Posteriormente el material continúa deformándose e incrementando la carga; esta elongación del material va acompañada de una reducción uniforme del área, debido a que el volumen permanece constante. La máxima carga alcanzada durante el ensayo, dividida por el área inicial del espécimen de prueba, recibe el nombre de **resistencia a la tracción o resistencia última del material (Su)**.

Como se explicó antes la ductilidad es la capacidad de un material para deformarse plásticamente sin fracturarse, y se puede expresar en función del incremento en la longitud ecuación 2.3.

$$\%e = \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100 \quad (2.3)$$

Existen otras propiedades que se pueden obtener del ensayo de tracción como son la tenacidad y la resiliencia nombradas anteriormente en el apartado 4.4.2. Dichas propiedades se hayan mediante las relaciones 2.4 y 2.5 respectivamente:

$$U_T = \frac{S_o + S_u}{2} \times ef \quad (2.4)$$

$$U_R = \frac{1}{2} S_o e_o \quad (2.5)$$

La curva esfuerzo – deformación ingenieril, no considera la variación que se va generando en el área de la sección transversal de la probeta. Por esto se determina la curva **esfuerzo – deformación real**, la cual considera tanto el cambio en la sección transversal como en la deformación infinitesimal. La deformación y el esfuerzo real se determinan a través de las siguientes relaciones:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.6)$$

$$\epsilon = \ln \frac{L}{L_o} = \ln \frac{A_o}{A} \quad (2.7)$$

Donde **A** es el área instantánea en mm, **ϵ** es la deformación real o logarítmica y **σ** es el esfuerzo real en MPa. La diferencia entre ambas curvas radica en que los valores de esfuerzos son más altos en la región plástica por considerar en los cálculos las áreas instantáneas, las cuales van disminuyendo, desplazando la curva hacia arriba; además la deformación logarítmica es menor a la ingenieril y genera un desplazamiento en la curva hacia la izquierda. Las deformaciones logarítmicas presentan la propiedad de

ser sumativas, a diferencia de las ingenieriles. La curva esfuerzo – deformación ingenieril puede relacionarse con la curva real mediante las ecuaciones 2.8 y 2.9.

$$\sigma = S(1 + e) \quad (2.8)$$

$$\varepsilon = \text{Ln}(1 + e) \quad (2.9)$$

Estas ecuaciones son válidas sólo hasta el punto máximo, debido a que luego de este punto el material entra en una etapa de inestabilidad plástica, y la variación de longitud *no es uniforme*, por lo que las ecuaciones anteriores no predicen el comportamiento real del material después de carga máxima. Es por esto que se recomienda medir la sección transversal a final del ensayo, determinar con este valor el esfuerzo real de ruptura **S_f**, y denotar solo este punto sobre la curva real después del punto máximo.

Conforme el esfuerzo aumenta el material se vuelve más resistente, debido al endurecimiento por deformación experimentado. Este comportamiento plástico del material a partir del esfuerzo de fluencia, si se lleva a una escala log-log, el resultado podría ser una relación lineal. Este comportamiento se puede representar mediante la ecuación 2.10 denominada **Ecuación de Fluencia o Ley de Hollomon.**

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (2.10)$$

Donde K es el coeficiente de resistencia expresado en MPa y n es el exponente de endurecimiento por deformación. **(Cabello S.)**

Ensayo de doblado.

El proceso de doblado se refiere a la deformación de una chapa alrededor de un eje recto. Durante la operación el material es sometido a un momento flector lo que genera un estado de compresión en el lado interno del

doblez y una tracción en el lado externo. La zona de transición donde no ocurre deformación se conoce como eje neutro. **(Cabello S.)**

Cuando la deformación es muy pequeña e inferior a 0,25, el plano neutro equidista de los extremos de la lámina deformada. Pero por lo general estas deformaciones son superiores y el plano neutro se desplaza hacia la zona de compresión, debido a que el esfuerzo de fluencia de los metales sometidos a compresión es ligeramente mayor que a tracción y esto hace que se abulte el lado interior del doblado, mientras que el lado exterior sujeto a tracción se adelgaza **(Aparicio G.)**.

En la operación de doblado existen diferentes tipos de punzón de acuerdo con el doblado lo que permite clasificar este ensayo en los siguientes:

- *Doblado en V.* La lámina se dobla entre un punzón y un lado en forma de V, los ángulos fluctúan desde lo más obtusos hasta los más agudos.
- *Doblado en Voladizo.* Este proceso involucra una carga voladiza sobre la lámina, pero se utiliza una prensa laminar. Análogo al utilizado en el caso de embutido, para sostener la base del material contra la matriz de doblado mientras el punzón aplica la carga para deformar la lámina.
- *Doblado de bordes.* Involucra el doblado en la lámina sobre sí misma, por lo general es más de un paso de doblado, lo cual se hace para eliminar el filo cortante o para aumentar la resiliencia y mejorar la apariencia.
- *Doblado en Rodillo.* Consiste en doblar una tira compleja con una serie de rodillos, tal es el caso de los canales, molduras, láminas acanaladas. También nombrado *Enderezado*, es un proceso diseñado para eliminar dobleces indeseables del material. El

enderezado se puede realizar haciendo pasar a la lámina por una serie de rodillos enderezados.

Al realizar una operación de doblado la prensa debe desarrollar una fuerza que varía a lo largo del recorrido del punzón. Para poder realizar un doblado debe comprobarse que la dobladora es capaz de desarrollar la fuerza máxima de doblado y que las herramientas (punzón y matriz) son capaces de soportar dicha fuerza. La fuerza que se requiere para realizar el doblado depende de la geometría del punzón y la matriz, así como de la resistencia, ancho y espesor de la lámina mediante la ecuación 2.11.

$$F_{\max} = K_b \frac{S_u w t^2}{C} \quad (2.11)$$

Donde:

K_b es un factor empírico adimensional.

S_u es el valor del esfuerzo de tracción en MPa.

w es el ancho de la probeta en mm.

t es el espesor de la probeta en mm.

C es la distancia entre los soportes de la matriz de doblado en mm.

Tabla 2.1. Valores del factor empírico de doblado kb.

| Tipo de doblado | kb |
|-------------------|------|
| Doblado en U | 2 |
| Doblado en V | 1,33 |
| Doblado de bordes | 0,33 |

Fuente: Iriza C. 2008

Otro método para estudiar el comportamiento de chapas dobladas es mediante el ensayo de doblado al aire cuya carga se puede determinar a partir de la ecuación 2.12.

$$F = \frac{wt^2\sigma_e \cos\alpha(\cos\alpha + \mu \operatorname{sen}\alpha)}{C - 2(R+t)\operatorname{sen}\alpha + \mu t \cos\alpha} \quad (2.12)$$

Donde:

α es el ángulo de doblado en grados.

R es el radio del punzón o de doblado en mm.

μ es el coeficiente de fricción entre el material del punzón y el material de la probeta.

σ_e es el esfuerzo de fluencia de la fibra externa en MPa que se calcula con la ecuación 2.13:

$$\sigma_e = K(\operatorname{Ln}\sqrt{1 + t/R})^2 \quad (2.13)$$

K , t y R son las mismas variables definidas en la ecuación 2.11. Mediante este ensayo se puede estimar además el grado de recuperación elástica mediante el estudio del momento flector elástico que experimenta el material una vez que se retira la carga sobre la lámina doblada, en dirección opuesta al momento flector de deformación. La recuperación elástica

disminuye la deformación de la pieza por cuyo motivo se incrementan tanto el ángulo como el radio de la pieza doblada lo que permite obtener una relación entre los ángulos y radios iniciales y finales independiente del espesor de la lamina que viene dado por la ecuación 2.14:

$$K_s = \frac{\alpha_f}{\alpha_o} = \frac{2R_o+1}{2R_f+1} \quad (2.14)$$

Donde:

α_f es el ángulo final de doblado.

α_o es el ángulo inicial de doblado.

R_o es el radio inicial de doblado.

R_f es el radio final de doblado.

2.2.5. Material en Estudio (AISI 201).

Composición química del acero AISI 201.

El acero a estudiar pertenece a una clasificación de aceros inoxidable nombrada anteriormente en la sección 2.2.2; la de aceros austeníticos, más específicamente a la serie 200 los cuales se caracterizan por no ser magnéticos y poseer moderada formabilidad. Según la norma AISI, la composición química que corresponde al acero 201 se puede observar en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Composición Química del AISI 201.

| AISI 201 | Porcentaje (%) |
|----------------|----------------|
| Cromo (Cr) | 16-18 |
| Manganeso (Mn) | 5,5 – 7,5 |
| Níquel (Ni) | 3,3-5,5 |
| Carbono (C) | 0,15 Max |
| Silicio (Si) | 1 |
| Fosforo (P) | 0,06 |
| Azufre (S) | 0,03 |

Fuente: Empresa Acerind.

Propiedades del acero AISI 201.

El acero AISI 201 cuenta con las propiedades físicas, mecánicas y térmicas que serán tabuladas a continuación en las tablas 2.3 y 2.4 respectivamente:

Tabla 2.3. Propiedades Físicas del acero 201.

| Especificación AISI | Densidad (Kg/dm ³) | Modulo de Elasticidad (N/mm ²) | Calor específico A 20 °C (J/Kg°K) | Conductividad Térmica (W/m°K) | Coefficiente de expansión térmica (x10 ⁻⁶ /°C) | Intervalo de Fusión (°C) |
|---------------------|--------------------------------|--|-----------------------------------|-------------------------------|---|--------------------------|
| AISI 201 | 7.8 | 197 | 500 | 16 A 100°C | 15.7 A 100°C | 1400/1420 |
| | | | | | 17.05 A 300°C | |
| | | | | 21 A 500°C | 18.2 A 500°C | |
| | | | | | 18.65 A 700°C | |

Fuente: Empresa Acerind.

Tabla 2.4. Propiedades mecánicas del AISI 201.

| Especificación AISI 201 | Dureza Brinell (HB) | Dureza Rockwell | Resistencia a la tracción (N/mm ²) | Límite Elástico (N/mm ²) | Elongación en 50mm (%) |
|-------------------------|---------------------|-----------------|--|--------------------------------------|------------------------|
| Recocido | 140/185 | 75/92 (HRB) | 590/750 | 215/340 | 55/45 |
| Trabajo en Frio | 250/385 | 25/41 (HRC) | 870/1200 | 500/900 | 25/8 |

Fuente: Empresa Acerind.

Tabla 2.5. Propiedades térmicas del AISI 201.

| Especificación AISI | Recocido (°C) | Temple (°C) | Forja (°C) | Temperatura máxima de operación (°C) |
|---------------------|---------------------------------|--------------|------------------|--------------------------------------|
| 201 | Enfriado rápido desde 1000/1120 | No Templable | Comienzo 1200 | Servicio continuo 800 |
| | | | Finalización 925 | Servicio intermitente 850 |

Fuente: Empresa Acerind.

Aplicaciones.

El acero 201 se usa en muchas aplicaciones en las que la calidad de los aceros AISI 304 y 316 eran tradicionalmente la elegida. La razón de la sustitución de estas últimas se debe a que el acero 201 es relativamente más económico por lo se puede apreciar su uso frecuente en los siguientes rubros:

- Industria alimenticia: utensilios con embuticiones extra profundas, línea de cocina, dispensadores de bebidas y máquinas para fabricación de hielo.
- Artículos de consumo: bombos de lavadoras y lavavajillas.
- Arquitectura y edificación: ascensores, fregaderos, escaleras, marcos para puertas y ventanas, revestimientos de columnas, cabinas telefónicas, mobiliario, puentes térmicos, barandillas, soportes y marcos estructurales.
- Transporte: accesorios de automoción, tapacubos, cepillos limpiacristales, llantas, piezas para camiones, contenedores para transporte, chasis de autobuses, camiones articulados y techos para vagones de tren.
- Industria: equipos para la elaboración de cerveza, procesos en las industria de alimentación y embalaje, abrazaderas para mangueras y aros para pistones.

2.3. PROCESOS DE SOLDADURA.

2.3.1. Definición.

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

Es necesario suministrar calor hasta que el material de aporte funda y una ambas superficies, o bien lo haga el propio metal de las piezas. Para que el metal de aportación pueda realizar correctamente la soldadura es necesario que cubra a los metales que se van a unir, lo cual se verificará siempre que las fuerzas de adherencia entre el metal de aportación y las piezas que se van

a soldar sean mayores que las fuerzas de cohesión entre los átomos del material añadido (**Tecnología industrial, 2008**).

2.3.2. Clasificación general de los Tipos de Soldadura.

Se pueden distinguir primeramente en 2 principales tipos:

Soldadura heterogénea. Se efectúa entre materiales de distinta naturaleza, con o sin metal de aportación: o entre metales iguales, pero con distinto metal de aportación. Puede ser blanda o fuerte.

Soldadura homogénea. Los materiales que se sueldan y el metal de aportación, si lo hay, son de la misma naturaleza. Puede ser oxiacetilénica, eléctrica (por arco voltaico o por resistencia), entre otros. Si no hay metal de aportación, las soldaduras homogéneas se denominan autógenas. Por soldadura autógena se entiende aquélla 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.

2.3.3 Soldadura por arco eléctrico (SMAW).

En la actualidad, la soldadura eléctrica resulta indispensable para un gran número de industrias. Es un sistema de reducido coste, de fácil y rápida utilización, resultados perfectos y aplicables a toda clase de metales. El procedimiento de soldadura por arco es un proceso realizado por fusión en el cual la unificación de los metales se obtiene mediante el calor generado por un arco eléctrico entre el electrodo y la pieza de trabajo y consiste en provocar la fusión de los bordes que se desea soldar mediante el calor intenso desarrollado por el arco eléctrico (ver figura 2.3). Los bordes en fusión de las piezas y el material fundido que se separa del electrodo se mezclan íntimamente, formando, al enfriarse, una pieza única, resistente y homogénea (**Tecnología industrial, 2008**).

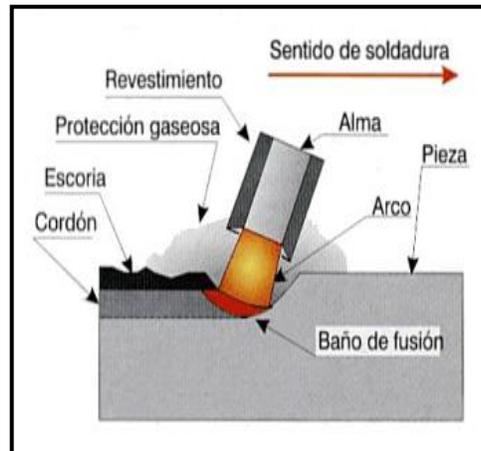


Figura 2.3. Soldadura por Arco Eléctrico. Tecnología industrial. I.E.S. “Cristóbal de Monroy”. Dpto. de Tecnología.

La soldadura por arco eléctrico se clasifica a su vez en:

- Soldadura por arco en atmósfera inerte (GMAW): Este procedimiento se basa en aislar el arco y el metal fundido de la atmósfera, mediante un gas inerte; helio, argón, hidrógeno, anhídrido carbónico, entre otros.
- Con electrodo refractario (TIG): El arco salta entre el electrodo de Wolframio o tungsteno (que no se consume) y la pieza, el metal de aportación es una varilla sin revestimiento de composición similar a la del metal base (ver figura 2.4).

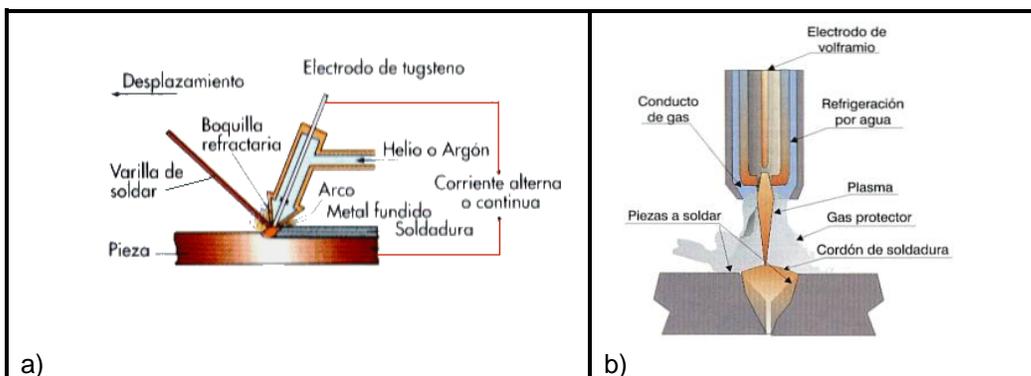


Figura 2.4. Soldadura Con electrodo refractario (método TIG). Tecnología industrial. I.E.S. “Cristóbal de Monroy”. Dpto. de Tecnología.

- Con electrodo consumible (MIG o MAG): Aquí se sustituye el electrodo refractario de wolframio por un hilo de alambre continuo y sin revestimiento que se hace llegar a la pistola junto con el gas (ver figura 2.5). Según sea el gas así recibe el nombre MIG (soldadura de metal con gas inerte) o MAG si utiliza anhídrido carbónico que es más económico. **(Tecnología industrial, 2008)**

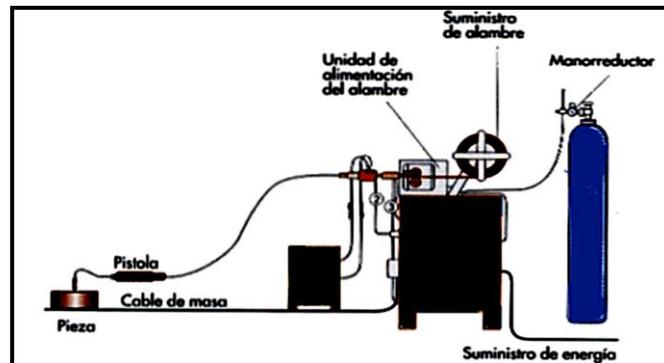


Figura 2.5. Soldadura Con electrodo consumible (método MIG y MAG).
Tecnología industrial. I.E.S. "Cristóbal de Monroy". Dpto. de Tecnología.

2.4. SOLDADURA METALICA CON ARCO ELECTRICO PROTEGIDO (SMAW).

2.4.1 *Introducción Histórica.*

Oscar Kjellberg fue el inventor del electrodo cubierto y de la soldadura por arco eléctrico en el año 1904 momento en el cual entregó en la oficina de patentes de Suecia una nota escrita a mano que describía su invención única, hasta ahora y al pasar del tiempo cientos de diferentes variedades de electrodos son producidos, a veces conteniendo aleaciones para el trabajo estructural metálico, fuerza y ductilidad para la soldadura.

2.4.2 *Descripción Preliminar.*

Un Arco Eléctrico es mantenido entre la punta de un electrodo cubierto y la pieza a trabajar y es producto del flujo continuo de electrones debido a la leve apertura de un circuito eléctrico cerrado. Las gotas de metal derretido son

transferidas a través del arco y son convertidas en un cordón de soldadura; un escudo protector de gases es producido de la descomposición del material fundente que cubre el electrodo, además, el fundente también puede proveer algunos complementos a la aleación. La escoria derretida se escurre sobre el cordón de soldadura donde protege el metal soldado aislándolo de la atmósfera durante la solidificación, esta escoria también ayuda a darle forma al cordón de soldadura especialmente en soldadura vertical y sobre cabeza. La escoria debe ser removida después de cada procedimiento. (Pereira, 2004)

La Sociedad Americana de Soldadura "AWS" ha establecido una serie de códigos de identificación y a su vez de Clasificación para los diferentes productos que las grandes y medianas fabricas de electrodos producen para abastecer el mercado, estos códigos se han convertido en la referencia más comúnmente usada en Latino-América por su fácil reconocimiento y manejo y aunque algunos fabricantes nombran sus productos con sus propios nombres comerciales, los usuarios en su mayoría prefieren llamarlos por su código de identificación de la AWS.

2.4.3 Equipo Básico para la soldadura SMAW.



Figura 2.6. Máquina para soldar Lincoln

La máquina más comúnmente utilizada en este tipo de procesos se ilustra en figura 2.6. Las maquinas para soldar se pueden clasificar según diversos criterios. Uno de ellos es según el tipo de movimiento:

Máquinas estáticas: son aquellas que no poseen elementos en movimiento continuo; excepcionalmente algunas poseen un ventilador. Estas a su vez se clasifican en:

- Máquinas tipo transformador: Proporcionan corriente alterna para soldar.
- Máquinas tipo rectificador: son máquinas transformadoras que, mediante rectificadores, transforman la corriente alterna a corriente continua.
- Máquinas tipo transformador-rectificador: estas máquinas proporciona tanto, corriente continúa, como corriente alterna. Su construcción eléctrica especial permite cambiar de una corriente a otra con solo mover una llave de conmutación.

Máquinas rotativas o convertidores: están compuestas básicamente de un motor que proporciona una determinada velocidad de rotación a un dinamo, el cual produce la corriente eléctrica apropiada para soldar. Se clasifican en:

- De motor eléctrico: funcionando con la corriente eléctrica proveniente de una red general.
- De motor de combustión: ya sea de gasolina o Diesel.

2.4.4 Selección del electrodo.

Para el caso específico de los aceros inoxidables el electrodo se designa con la clasificación propia del acero por ejemplo, un acero AISI 347 se debe soldar con un electrodo AWS E 347-16. Prácticamente se ha fabricado un determinado tipo de electrodo para cada tipo de acero inoxidable

sin embargo hay pequeños grupos que pueden ser soldados con el mismo electrodo como por ejemplo los aceros AISI 301, 302, 303, 304 y 308 que se pueden soldar con el AWS 308L-16 en vista que todos estos aceros son del tipo 18/8 (18%Cr, 8%Ni). A la hora de seleccionar se deben tener en cuenta las siguientes medidas:

- Asegurarse que el material del electrodo tenga una composición química similar al material base.
- No siempre es posible emplear un electrodo estabilizado, si el acero no es estabilizado.
- No es recomendable soldar un acero inoxidable Cr-Ni con un electrodo Cr-Ni-Mo ya que en presencia de ciertos medios el material depositado puede sufrir una corrosión más rápida.
- Por ningún motivo debe emplearse un electrodo con menor contenido de Níquel y Cromo que el material a soldar.

A continuación se muestra la tabla con la designación AWS de algunos electrodos y el respectivo acero inoxidable para el que se utilizan.

Tabla 2.6. Designación AWS de electrodos para distintos materiales.

| Especificación AISI | Electrodo |
|----------------------------|------------------|
| 201 | E 308L-16 |
| 202 | E 308L-16 |
| 304 | E 308L-16 |
| 316 | E 316L-16 |
| 316-L | E 316L-16 |

Fuente: Empresa Oerlikon.

2.5. CORROSION.

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

2.5.1 Mecanismos Electroquímicos de la Corrosión.

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

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

El hombre invierte mucha energía para extraer el metal de los yacimientos encontrados en la Tierra. Si se piensa en el balance térmico global empleado durante la extracción del hierro en los altos hornos a partir de un mineral de hierro oxidado, tal como la hematita (Fe_2O_3), se nota que el hombre invierte grandes cantidades de energía termoquímica con el fin de liberar el hierro del oxígeno con la ayuda de coque (carbono), obteniéndose como productos la liberación de bióxido de carbono (CO_2), escoria y el hierro primario, también llamado arrabio.

En otros muchos procesos pirometalúrgicos tales como aquellos empleados para obtener cobre, zinc, níquel, plomo y otros metales, el consumo de energía ocurre de una manera similar. En estos procesos también se utilizan calor y atmósferas calientes como fuentes de energía para facilitar la obtención del metal. Otra manera alternativa para recuperar ciertos

metales consiste en la descomposición de un electrolito por medio del paso de corriente eléctrica. Un electrolito es un medio iónico conductor de la electricidad. Puede ser una disolución acuosa de una sal conteniendo al metal de interés, por ejemplo, sulfato de cobre, o bien la misma sal fundida, la alúmina u óxido de aluminio como ejemplo. Esta descomposición ocurrirá, como se mencionó, por el efecto del paso de una corriente eléctrica a través del electrolito, dando como principal producto el depósito, en uno de los electrodos, del metal que interesa recuperar. De ésta y otras muchas maneras se puede obtener metal en forma libre, pero consumiendo grandes cantidades de energía.

Se entiende entonces que, el estado de existencia más estable para un metal es su forma combinada, o dicho desde un punto de vista termodinámico, es el estado de más baja energía, ya sea en forma de óxido, sulfuro, cloruro, sulfatos o carbonatos. En realidad lo que se hace para extraer el metal es ir en contra de una reacción que ocurre espontáneamente en la naturaleza, por ejemplo, la reacción de formación de un mineral oxidado.

Muchas de las formas combinadas de los metales han permanecido tal y como se encuentran ahora por muchos miles de millones de años. Es muy posible que cuando los elementos aparecieron en el universo, poco tiempo después de la creación de éste (hace aproximadamente 15 mil millones de años) muchas de las especies metálicas comenzaron a reaccionar con otros elementos recién formados.

Con el paso del tiempo y con la formación y estabilización de galaxias y sistemas solares, muchos planetas, y entre ellos el nuestro, acumularon una gran cantidad de metales en su interior, que fueron reaccionando con el medio ambiente y con la atmósfera reinante entonces. El paso de metal a forma combinada fue cosa de millones de años. Lentamente, el metal iba pasando de un estado inestable a uno más estable que es la forma combinada. Aunado

a esta transformación espontánea venía un cambio en energía. El sistema en proceso de transformación cedía energía lentamente y pasaba de un estado de energía mínima, a un estado estable, en equilibrio.

Industrialmente, lo que se hace hoy en día es suministrar al mineral una cantidad de energía equivalente a la que la reacción cedió a través de mucho tiempo para pasar a la forma combinada. Al obtener un metal en forma libre volvemos al estado inicial. El metal libre, que posee una energía elevada y con fuertes tendencias a bajarla, tenderá a estabilizarse, reaccionando con el medio ambiente y volviendo a su forma de mineral original, ciclo que se puede observar en la figura 2.7.

El cobre, el cinc, el níquel, el cromo, el hierro, el aluminio, el plomo, el estaño y la mayoría de los metales ingenieriles que se utilizan, sufren esa tendencia después de ser obtenidos en su forma libre. Se puede decir, como una aceptable generalización, que cuanto mayor haya sido la cantidad de energía invertida en la obtención de un metal a partir de su mineral (térmica, eléctrica o de otro tipo), mayor será su tendencia a volver a combinarse para estabilizarse.

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

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

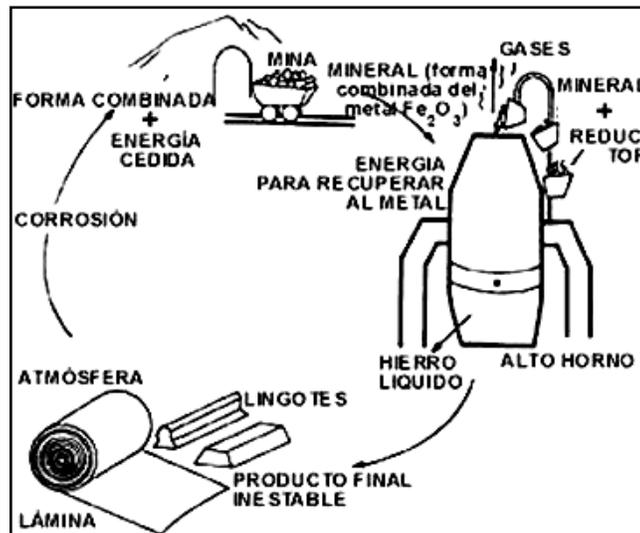


Figura 2.7. Ciclo que sigue el hierro hasta volver a su estado estable. Ávila y Genescá, (1987).

2.5.2 Mecanismos Electroquímicos de la Corrosión.

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

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

Algunas celdas galvánicas reciben nombres especiales. Una *celda de corrosión* es una celda o pila galvánica en la cual las reacciones electroquímicas que tienen lugar conducen a la corrosión. Una celda de corrosión de dimensiones muy pequeñas (por ejemplo $< 0,1\text{mm}$) se conoce como *celda de acción localizada o microcelda galvánica*. Las celdas locales o micropilas se dan, por ejemplo, en aleaciones multifásicas o en metales con

recubrimientos que presentan buena conductividad eléctrica o en inclusiones de óxidos, sulfuros, carbón, entre otros. La acción de estas celdas a menudo conduce a un ataque localizado, tal como picaduras o corrosión bajo tensión.

2.5.3 Definición de Ánodo y Cátodo.

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

Generalmente, se toman como válidas las siguientes reglas:

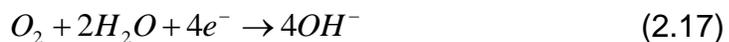
a) La reacción anódica es una oxidación y la reacción catódica una reducción.

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

La corrosión electroquímica es un proceso espontáneo que denota siempre la existencia de una zona anódica (la que sufre la corrosión), una zona catódica y un electrolito, y es imprescindible la existencia de estos tres elementos, además de una buena unión eléctrica entre ánodos y cátodos, para que este tipo de corrosión pueda tener lugar. La corrosión más frecuente siempre es de naturaleza electroquímica y resulta de la formación sobre la superficie metálica de multitud de zonas anódicas y catódicas; el electrolito es, en caso de no estar sumergido o enterrado el metal, el agua condensada de la atmósfera, para lo que la humedad relativa deberá ser del 70%. **(Uzcátegui, 1973)**

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

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



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

2.5.4 Efecto de la Temperatura.

Cuando la corrosión es controlada por la difusión del oxígeno, la velocidad de corrosión a una concentración dada de O_2 es aproximadamente el doble para un incremento de 303,15 K (30°C) en la temperatura. En un recipiente abierto que permita el escape del O_2 disuelto, la velocidad se incrementa con la temperatura hasta los 353,15 K (80°C) aproximadamente y luego cae, mientras que en un recipiente cerrado, el O_2 no puede escapar la

velocidad de corrosión continúa aumentando hasta que el O_2 es totalmente consumido.

Cuando la corrosión está acompañada por la evolución de hidrógeno, el incremento en la velocidad es más del doble para los 303,15 K (30°C) de aumento de la temperatura. **(Uzcátegui. 1973)**

2.5.5 Efecto del pH.

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

La pérdida en peso reportada en la totalidad de los mismos se encontró que era igual para los cubiertos y no cubiertos de cobre, toda la cantidad de O_2 que alcanza las áreas catódicas de la superficie del hierro, producen a si mismo una cantidad equivalente de Fe^{++} . Dentro de este rango no tienen efecto la variación de la composición ni los tratamientos térmicos.

Dentro del rango ácido ($pH < 4$), la película de óxido ferroso hidratado es disuelta, el pH superficial cae, y el hierro está más o menos en contacto directo con el medio acuoso, luego el incremento en la velocidad de reacción está determinada por la suma de los efectos de la velocidad de evolución del hidrógeno y el carácter despolarizador del oxígeno. En este caso tienen efectos los tratamientos térmicos que proporcionan mayor o menor sobre

voltaje de hidrógeno en las fases presentes en los aceros al carbono, por ejemplo, en un acero de bajo carbono la *cementita* es una fase de bajo sobrevoltaje de hidrógeno, la velocidad de corrosión será más baja en un medio ácido que la de los aceros altos en carbono. **(Uzcátegui, 1973)**

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

2.5.6 Clasificación de la Corrosión.

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

Corrosión uniforme (Generalizada).

Se caracteriza por una reacción electroquímica que actúa en la superficie completa del material expuesto como se puede apreciar en la figura 2.8. La tasa de corrosión es presentada a menudo como una pérdida de peso. Es relativamente fácil de controlar por medio de coberturas protectoras, inhibidores o protección catódica, debido a que permite un mayor seguimiento y prevención. Este tipo de corrosión es muy predecible, y es la base de la mayoría de las ecuaciones para la predicción de la corrosión.



Fig. 2.8. Corrosión Uniforme. Laboratorio de Físico-química de la empresa INSA.

Corrosión galvánica.

Es causada por una reacción electroquímica entre dos metales disímiles en contacto o eléctricamente conectados uno con el otro en un electrolito. En un medio corrosivo, los dos metales diferentes forman un electrodo cortocircuitado y constituyen una celda electroquímica como la que se observa en la figura 2.9.

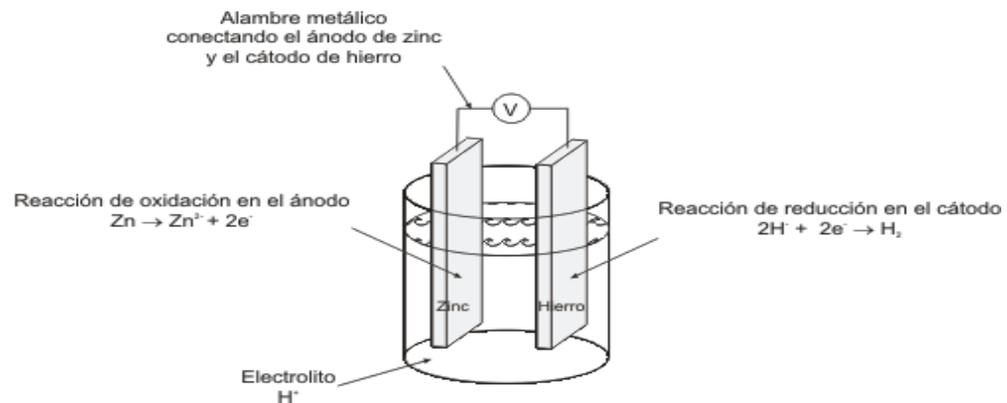


Fig. 2.9. Corrosión Galvánica. Laboratorio de Físico-química de la empresa INSA.

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

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

Corrosión por grietas.

Es una forma de corrosión localizada que ocurre dentro de las zonas de estancamiento creadas por las interfaces de dos superficies. La corrosión por agrietamiento puede ocurrir bajo arandelas, tornillos, juntas, anillos de sellado, remaches, abrazaderas, entre otros. Los diversos factores ambientales que causan la corrosión por grietas la hacen casi imposible de simular las condiciones de campo en el laboratorio, así como también el empleo de pruebas para acelerarla. (Ver figura 2.10).

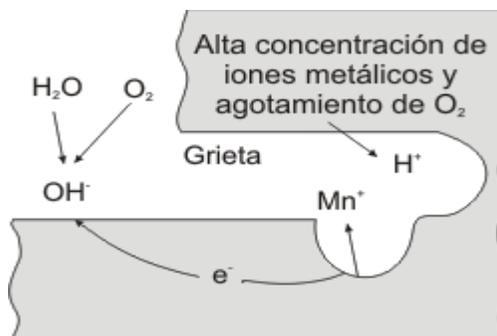


Fig. 2.10. Corrosión por grietas. (Perry, 1998)

Corrosión por picaduras.

Es una forma de corrosión localizada que actúa con una tasa mínima de pérdida de metal, lo que dificulta su detección. Debido a que los pequeños agujeros que se forma pueden quedar tapados con los productos de la corrosión. Por este motivo la corrosión por picadura suele ocasionar de repente fallos inesperados. Las picaduras comienzan en aquellas zonas donde se produce un incremento de la velocidad de corrosión, como por ejemplo, en impurezas u otras heterogeneidades presentes en los metales. Un ejemplo claro de este fenómeno se ilustra a continuación en la figura 2.11.

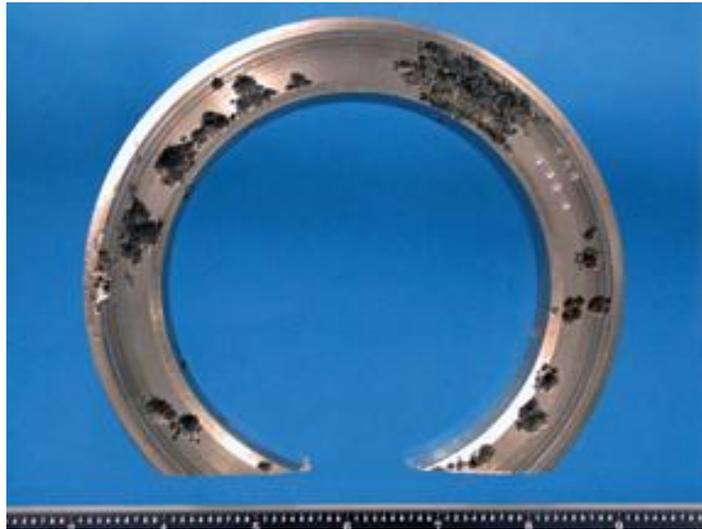


Fig. 2.11. Corrosión por picaduras. (Perry, 1998)

Corrosión Intergranular.

Este fenómeno ocurre con más frecuencia en las fronteras de grano, usualmente con poco o despreciable ataque a los granos adyacentes. En estos casos se produce una corrosión intergranular que origina una disminución importante de la resistencia mecánica del material. (Ver figura 2.12)

- 44 *Evaluación de las uniones soldadas realizadas con el proceso de soldadura por arco eléctrico del acero AISI201 expuestas a ambientes marinos.*



Fig. 2.12. Corrosión Intergranular. (Perry, 1998)

Corrosión por erosión.

Se trata de desgastes superficiales provocados por la fricción entre dos superficies sólidas, que da lugar a que partículas de óxido unidas a la superficie de un material se desprendan y actúen a modo de abrasivo entre las superficies en contacto. También se produce corrosión erosiva en las superficies que se encuentran en contacto con líquidos que circulan a alta velocidad como el pistón que se ilustra en la figura 2.13.



Fig. 2.13. Corrosión por erosión. (Perry, 1998)

Corrosión por tensión.

Es inducida por la acción combinada de la fatiga mecánica y el proceso de corrosión. Los esfuerzos estáticos de tracción, unido con la exposición del material a una atmósfera determinada, provoca una situación similar a la fatiga. Conforme transcurre el tiempo, las fisuras que se originan en un material que sufre corrosión bajo tensión crecen de tamaño. Cuando una de estas fisuras sea lo suficientemente grande produce, sin previo aviso, una fractura, que se puede presentar, al igual que en el caso de la fatiga, bajo tensiones inferiores al límite elástico del material. (Ver figura 2.14)



Fig. 2.14. Corrosión por tensión. (Perry, 1998)

Corrosión salina neutra.

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

Corrosión salina ácida.

Este tipo de corrosión se produce por ambientes activos en los cuales, además de la presencia de sales diversas tales como cloruro de sodio (NaCl), sulfato de cobre (SO_4Cu), entre otras, pueden existir concentraciones de ácidos, tales como ácido acético procedente de las siliconas empleadas en la

carpintería, ácido úrico en las granjas, entre otros. Este tipo de corrosión es muy común en las estructuras construidas en zonas costeras como se ilustra en la figura 2.15.



Fig. 2.15. Corrosión salina. (Perry, 1998)

CAPÍTULO 3

Marco Metodológico

A continuación se realiza la descripción del tipo de investigación que se llevó a cabo, tomando en consideración el diseño y nivel de la misma relacionada con la manera como se obtienen y analizan los datos y las actividades a realizar para tal fin.

3.1. NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN.

Ésta se caracterizó por ser de tipo experimental como lo describe **Yaselli Barrios** en su manual de trabajos de grado, debido a que se deben reproducir condiciones en el laboratorio (banco de ensayo) para producir corrosión en las muestras de acero.

La investigación se basó en la caracterización del fenómeno que constituye la realización de ensayos de corrosión con rocío salino en juntas de acero inoxidable AISI 201 soldadas a tope a través del proceso SMAW, para determinar el comportamiento del mismo una vez expuesto a tres períodos diferentes de corrosión (48, 96, y 168 horas según recomienda la norma ASTM designación B 117- 07).

3.2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.

La información necesaria para dar respuesta al planteamiento del problema se obtuvo, en primer lugar, mediante la investigación documental, (**Barrios Y., 2003**) asistida por información recopilada de sitios en Internet y revistas electrónicas, consultas bibliográficas, trabajos de investigación y

consulta a personas con conocimientos en este campo. Posteriormente se adoptó la investigación experimental mediante la realización de ensayos de laboratorio para la obtención de resultados.

3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.

La observación directa fue la técnica empleada para la recolección de datos en los ensayos a realizar aunque para el caso particular del ensayo de tracción los datos se obtuvieron directamente del controlador del banco de ensayo (Computador). Los resultados y evidencias obtenidas, fueron recopilados en gráficas, tablas, fotografías para los ensayos de corrosión, tracción, doblado y metalografía. Estos ensayos se realizaron siguiendo las normas establecidas para tal fin que en este caso en particular son las normas ASTM (American Society for Testing and Materials).

3.4. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO DE DATOS.

A los datos recopilados se le aplicó un análisis comparativo entre los obtenidos de las probetas expuestas al ensayo de niebla salina y los conocidos de probetas no expuestas a dicho ensayo, con el fin de establecer cómo varían las propiedades mecánicas en estudio con la exposición a la corrosión acuosa.

3.5. ADQUISICIÓN DEL MATERIAL DE ESTUDIO.

El material a estudiar fue suministrado por la Empresa AUSTINOX C.A. distribuidora de aceros inoxidables, ubicada en la Zona Industrial Municipal Norte del Estado Carabobo RIF. J-00211677-3. Se obtuvo la cantidad de una lámina con las dimensiones suficientes para fabricar las probetas.

3.6. ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS.

Las probetas se realizaron a partir de láminas de 2 milímetros de espesor de acero inoxidable AISI 201 de 2,4 m de largo y 1,2 m de ancho.

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

Material de probetas para ensayo de tracción.

Con el fin de cumplir las especificaciones de la Norma ASTM E8-98, para las probetas soldadas de tracción se extrajeron tiras de 210 mm de la lámina y luego se cortaron en dos partes iguales en sentido horizontal, para ser posteriormente unidas por el proceso de soldadura. En la figura 3.1 se muestra la configuración.

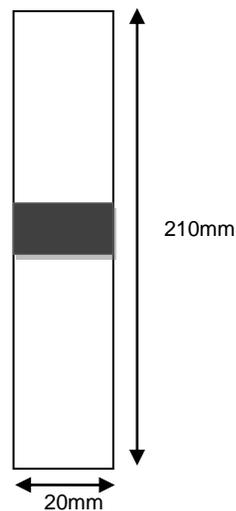


Figura 3.1. Tiras para la fabricación de probetas de tracción.

En la figura 3.1 se observa en el centro de la misma el cordón de soldadura que es realizado en sentido perpendicular al sentido de corte de la probeta.

Material de probetas para ensayo de doblado.

Con el fin de cumplir las especificaciones de la Norma ASTM E290-97a, para las probetas soldadas para doblado se extrajeron tiras de 210 mm de la lámina en el sentido de laminación debido a que en este sentido dichas probetas pueden ser sometidas a radios pequeños de doblado. Luego se cortó en dos partes iguales en sentido horizontal, para ser posteriormente unidas por el proceso de soldadura en el centro de la misma. En la figura 3.2 se muestra la configuración.

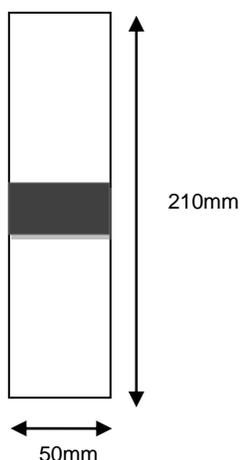


Figura 3.2. Tiras para la fabricación de probetas de doblado.

3.6.2. Proceso de elaboración de las juntas soldadas.

Las láminas ya cortadas se unieron de manera permanente utilizando el proceso de soldadura por arco protegido (SMAW). Para realizar las juntas soldadas se empleó una máquina soldadora Linconl Ac 225 GIm, tipo Capillita (Ver Tabla 3.1 y figura 3.3), que se encuentra en el Centro Nacional de Capacitación y Educación Socialista (INCES) y que fue operada por un soldador especializado de la misma institución.

Tabla 3.1. Características de la Máquina de soldar utilizada.

| | |
|-------------------------|-----------------------------|
| Marca | Lincoln |
| Modelo | GLM |
| Conexión | 208 / 230 V, 2 fases, 60 Hz |
| Rango de trabajo | 5 – 225 A, 10 – 28 V |

Fuente: Catalogo Lincoln 2008.

Equipos utilizados.

- Máquina de Soldar Lincoln Ac 225, mostrada en la figura 3.3.



Figura 3.3. Máquina para soldadura utilizada. Fuente: Lincoln, 2008.

- Esmeril utilizado para eliminar la rebaba originada por la cuchilla al cortar las láminas transversalmente. También se utilizó para eliminar la cascarilla que pudiese contaminar la junta en la superficie cercana a la soldadura.

- Cortadora de cierra para acero
- Prensa empleada para sujetar las secciones al momento de realizar el proceso de unión.
- Máscara para soldar.
- Mesa de sujeción, guantes de protección contra quemaduras.

Materiales utilizados.

- Electrodo recubierto E 308L-16. Recomendado por la Empresa Oerlikon para los aceros de la serie 200.
- Disco para esmeril.
- Cinta para cierra de cortar acero.

Parámetros de las soldaduras.

El tipo de junta de la soldadura fue “A Tope” recomendada por la empresa Oerlikon para material base con espesores menores a 6mm. Para la selección de los parámetros adecuados para la soldadura, se realizaron uniones utilizando muestras del material de estudio (AISI 201). Luego sólo se variarán los valores de corriente entre 50-70A según recomendaciones de la empresa fabricante del electrodo Lincoln Electric, con el fin de establecer comparaciones entre las diferentes intensidades de corriente y determinar el valor más apropiado, pero el resto de los parámetros como el voltaje permaneció constantes. Las especificaciones del proceso de soldadura se detallan en el formato EPS ilustrado en el anexo N 1.

Las juntas no soportadas con sostenes, se puntearon para mantener una alineación y espaciado uniforme. Los puntos se hicieron en secuencia para minimizar el efecto de contracción. Para realizar el montaje de dos chapas, se debieron hacer dos puntos en cada extremo de la chapa, y luego una en el medio, tal como se muestra en la figura 3.4 (A). La figura 3.4 (B)

muestra cómo se acercan las chapas cuando los puntos se realizan desde un extremo hacia el otro.

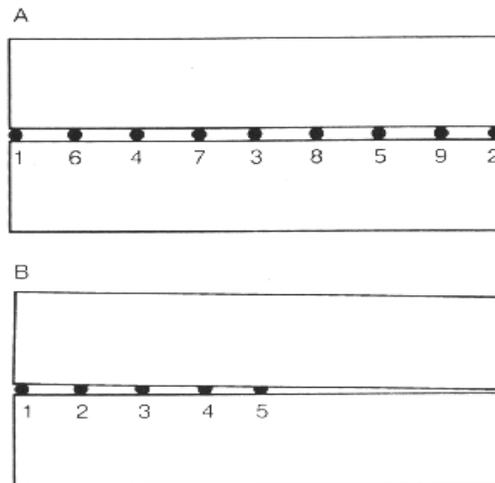


Figura 3.4. Técnica a utilizar para realizar la soldadura. Manual de soldadura y catalogo de productos. Empresa Oerlikon.

En la Figura 3.4 se ilustra que los puntos de soldadura en el acero inoxidable deberán estar considerablemente más juntos que lo que sería necesario para el acero al carbono, dado que una expansión térmica más grande del acero inoxidable causa mayor distorsión. Una guía aproximada es usar la mitad de la distancia que se usa en el acero al carbono, cuando la distorsión es un factor importante.

3.6.3. Elaboración de las probetas de tracción.

La probeta ensayada fue tipo lámina realizada según las especificaciones de la norma ASTM E-8, cuyas dimensiones normalizadas se ilustraran a continuación en la figura 3.5.

- 54 Evaluación de las uniones soldadas realizadas con el proceso de soldadura por arco eléctrico del acero AISI 201 expuestas a ambientes marinos.

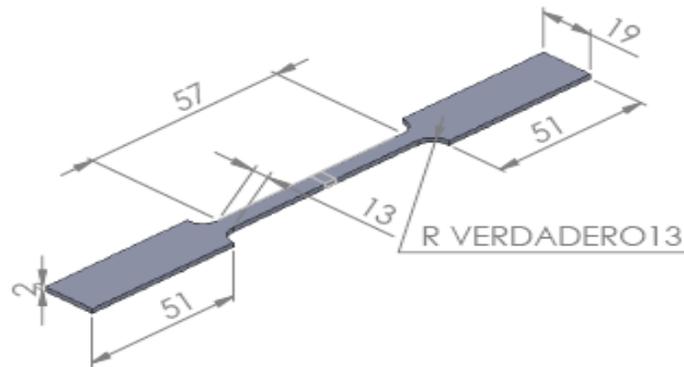


Figura 3.5. Dimensiones para las probetas de tracción. Fuente: Normas ASTM E-8.

Todas las probetas de tracción fueron realizadas utilizando un banco de Corte por plasma C.N.C., marca PIERCE, de la empresa INVERSIONES EC, C.A., RIF. J-29629935-8, ubicada en Maracay, estado Aragua, que fue operada por un técnico Especializado.

3.6.4. Elaboración de las probetas de doblado.

Para el ensayo de doblado las probetas de realizaron con las dimensiones recomendaciones en la norma ASTM E-290 y se fabricaron con las dimensiones ilustradas en la figura 3.6.

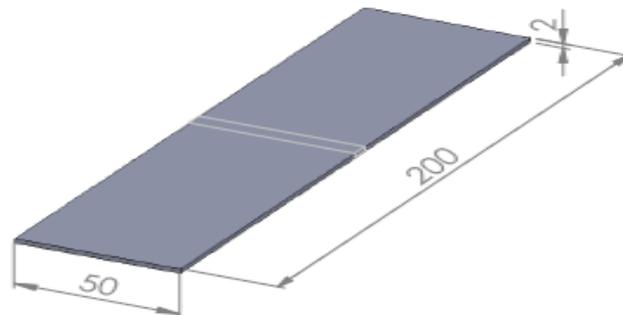


Figura 3.6. Dimensiones para las probetas de doblado y metalografía. Guía de laboratorio de Procesos de Fabricación I. Prof. Jennifer Aparicio

3.7. PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES.

3.7.1. *Ensayo de Corrosión.*

El ensayo de corrosión se llevó a cabo en una Cámara de Niebla Salina Estándar (figura 3.7), que se encuentra en el Laboratorio de Materiales de la Universidad de Carabobo y cuyas características se muestran en la tabla 3.6.

Tabla 3.2. Características de la Cámara de Niebla Salina.

| | |
|-----------------------------|------------------|
| Marca | The GS Equipment |
| Modelo | 0831 0010 |
| Año de fabricación | 1980 |
| Fecha de calibración | 16/04/2009 |

Fuente: Yépez y Affaqui 2009



Figura 3.7. Cámara de niebla salina para ensayos de corrosión. Fuente: propia.

El ensayo se registrará según la norma ASTM designación B 117- 03.

Dimensiones y preparación superficial de la muestra.

Las probetas que fueron sometidas al ensayo de niebla salina deben tener una longitud recomendada de 100mm a 200mm como se establece en la norma ASTM G50. Además deben contar con características superficiales aptas para que no se altere su posterior evaluación con respecto a la acción de la corrosión sobre ellas. Idealmente se tiene que lograr que la superficie de la muestra sea igual a la superficie real, pero esto generalmente es difícil de lograr. Sin embargo las muestras a ensayar deben prepararse previamente, lavando las probetas a ensayar para eliminar los óxidos y contaminantes depositados en éstas. Si la superficie de la muestra es muy rugosa o irregular es necesario hacerle esmerilado o pulido con un alambre abrasivo basto, para luego hacerle pulido final. Todas estas operaciones deben realizarse evitando un excesivo calentamiento de la muestra.

Preparación de la Solución Salina.

Según la especificación ASTM B117- 03 la solución debe ser preparada disolviendo 5 ± 1 partes por unidad de masa de cloruro de sodio (NaCl) en 95 partes de agua (destilada o desmineralizada conformada según la especificación ASTM D1193). La sal utilizada debe ser cloruro de sodio sustancialmente libre de níquel, cobre y cualquier otro contaminante seco (menos de 0,3% de impurezas totales). El pH de la solución debe estar entre 6,5 y 7,2.

Períodos de Exposición.

Las probetas fueron sometidas a tres períodos de exposición; 48, 96 y 168 horas, Periodos que son sugeridos en la norma ASTM B117- 03. Sin embargo como complemento del experimento se incorpora un periodo adicional de 336 horas por tratarse de un material altamente resistente a la corrosión.

Evaluación de la Corrosión.

Basado en la norma ASTM G50 se realizaron ensayos de tracción a probetas no sometidas a corrosión y luego a probetas del mismo material sometido a ensayos de corrosión, con el fin de determinar las variaciones en el porcentaje de elongación y en el esfuerzo de tracción (esfuerzo máximo).

3.7.2. Ensayo de Tracción.

El ensayo de tracción es el método más confiable para evaluar propiedades mecánicas de un material y a su vez lograr conocer las limitaciones del mismo a soportar esfuerzos ante cualquier situación para la cual vaya a ser empleado y bajo cualquier parámetro de diseño.

Se debe ensayar más de una probeta para comprobar la repetibilidad o consistencia en los valores obtenidos y verificar si existen errores de medición. En este caso se analizaron 4 probetas soldadas sometidas al ensayo de corrosión por cada periodo a evaluar, 4 probetas soldadas no sometidas al ensayo de corrosión y 4 probetas del material base sin soldadura y sin exposición a la corrosión. Luego se tomó el promedio de las propiedades determinadas para las probetas de las mismas características para que el valor sea más cercano a la realidad. Adicionalmente, las probetas que fallen fuera de la zona calibrada o fracturen en la soldadura no serán tomadas en cuenta en los análisis, ya que se consideran no válidas. Tomando en cuenta esta especificación se elaboraron 25 probetas con soldadura y 5 probetas sin soldadura, colocando un excedente de una (1) probeta para cada grupo para seleccionar las cuatro (4) probetas que se comporten de manera más regular.

Equipos utilizados.

- Máquina Universal de Ensayos Mecánicos (figura 3.8), Marca Galdabini, con capacidad máxima de 200.000 N (20 Ton) de carga y 200 mm/min de velocidad máxima.

- Sistema computarizado para recolección de data.



Figura 3.8. Máquina Universal de Ensayos Mecánicos utilizada. Fuente: Propia.

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

Procedimiento del ensayo.

- Se midió y marco la longitud calibrada (L_0) en cada probeta.
- Se midió el ancho inicial y el espesor inicial para calcular el área transversal inicial de la sección calibrada de la probeta utilizando la ecuación 3.1 descrita a continuación:

$$A_0 = W_0 * T_0 \quad (3.1)$$

Donde:

A_0 : área transversal en la sección reducida en mm^2 .

W_0 : ancho de la probeta en la sección reducida en mm.

T_0 : espesor de la probeta en la sección reducida en mm.

- Indicar los parámetros del ensayo en el software controlador del equipo. La carga se estableció en 40000 N tomando en cuenta que la carga mínima necesaria para que el acero AISI 201 comience a deformarse es 20000 N. La Velocidad del ensayo de 4 mm/min, valor se encuentra dentro del rango recomendado en la norma ASTM E 8M según la longitud de la sección reducida de las probetas de tracción.

- Se colocó la probeta entre las mordazas de la máquina de ensayos.

- Se comenzó a aplicar la carga sobre la probeta hasta la rotura de la misma.

- Se guardó los datos digitales correspondiente a la gráfica fuerza vs. alargamiento para cada probeta.

- Se tomaron las medidas finales; la longitud final (L_f), el espesor final (T_f) y el ancho final de la sección reducida (W_f); en la zona donde falla el material.

- Con los dos parámetros obtenidos anteriormente (L_o , L_f , W_o , W_f , T_f), se determinó el porcentaje de elongación mediante la ecuación 2.2 ilustrada en el capítulo 2 y el área final mediante la ecuación 3.1.

- Se determinó la curva esfuerzo ingenieril vs. Deformación mediante la ecuación 2.1 y 2.2 ilustradas en el capítulo 2. Con las curvas de cada ensayo se realizó un promedio punto a punto para hallar un curva promedio para cada condición a evaluar.

Con el ensayo de tracción se obtiene información sobre el material base y las juntas soldadas como su ductilidad así como su diagrama Esfuerzo vs. Deformación. Además se obtiene la data sobre el esfuerzo último, esfuerzo de fluencia y porcentaje de elongación.

3.7.3. Ensayo de Doblado en “U”.

Se debe ensayar más de una probeta con el fin de evaluar fallas como grietas y discontinuidades entre material base y cordón de soldadura por cada periodo a evaluar. Se ensayaron 8 probetas de las cuales se seleccionaron las que no presentaron fallas a la hora de ensayar.

Equipos utilizados.

- Se utilizó el mismo banco que para el ensayo de tracción constituido por la Máquina Universal de Ensayos Mecánicos, sistema computarizado para recolección de data y Compresor de aire COMAIR. (figura 3.8)
- Punzón de doblado diseñado según especificaciones de la norma ASTM E 190-92. (ver figura 3.9)



Figura 3.9. Punzón para doblado. Fuente: propia.

- Vernier. Marca Mitutoyo utilizado en el ensayo de tracción.

Procedimiento del ensayo.

- Medir el ancho inicial (W_0) de la probeta para hallar la carga teórica de doblado posteriormente mediante la ecuación 2.11 ilustrada en el capítulo 2.
- Se indicó los parámetros del ensayo en el software controlador del equipo. La carga se estableció en 40000 N como en el ensayo de tracción y Velocidad del ensayo de 4 mm/min.
- Se colocó la matriz y el punzón entre los mandriles de la máquina de ensayos.
- Comenzar a aplicar la carga sobre la probeta hasta doblado de la misma.
- Guardar el valor de la carga máxima obtenida durante el ensayo para ser comparado con la carga teórica.
- Se realizó una observación macroscópica (sin aumento) de las probetas para verificar la presencia de fisuras u otras discontinuidades.

3.7.4. Ensayo de Doblado al aire.

Se debe ensayar más de una probeta con el fin de evaluar la variación de las propiedades elásticas por cada periodo a evaluar. Tomando en cuenta esta especificación se ensayaron 8 probetas.

Equipos utilizados.

- Se empleo los mismos equipos e instrumentos que fueron utilizados para el doblado en “U” y además un Goniómetro marca Mitutoyo (apreciación de 5', rango 0-180°).

Procedimiento del ensayo.

- Se midió el ancho inicial (W_0) de la probeta para utilizarlo posteriormente para el cálculo de la carga teórica mediante la ecuación 2.12 del capítulo 2.
- Se indicó los parámetros del ensayo en el software controlador del equipo. La carga se estableció en 40000 N y Velocidad del ensayo de 4 mm/min.
- Se colocó la matriz y el punzón entre los mandriles de la máquina de ensayos y se comenzó a aplicar la carga sobre la probeta hasta el doblado de la misma.
- Se guardo el valor de la carga máxima obtenida durante el ensayo para realizar una comparación de la carga experimental con la carga teórica.
- Guardar los datos digitales correspondiente a la gráfica carga vs. alargamiento para cada probeta con la finalidad de utilizarlo para hallar las constantes K y n necesarias para hallar la carga teórica.
- Se midió el ángulo final de doblado de todas las probetas para evaluar su recuperación elástica.



Figura 3.10. Ensayo de doblado al aire. Fuente: propia.

3.7.5. Ensayo de metalografía.

El objetivo principal de la realización del ensayo metalográfico es revelar los microconstituyentes del material base y su tamaño de grano. Las secciones para la realización de este ensayo se extrajeron de las probetas de doblado cortando secciones cuadradas de 12mm de lado donde este localizado el cordón de soldadura. Este procedimiento esta descrito por la norma ASTM E3 - 01.

Equipos y materiales utilizados.

- Baquelita negra.
- Máquina de desbaste/pulido Marca Buehler, modelo Ecomet II. (figura 3.11)
- Desbastadora de cinta, 1360 rpm.
- Lijas con tamaño de grano 80, 120, 240, 400, 500, 600, 1200.



Figura 3.11. Máquina de desbaste y pulido disponible en el Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo.

- Pulidora Buehler para pulido grueso y fino.
- Paño de pulido grueso marca Buehler, modelo Billard, color verde

- Paño de pulido fino marca Buehler, modelo Microcloth, color marrón.
- Alúmina gruesa, marca Buehler, modelo Masterpolish
- Alúmina fina, marca Buehler, modelo Micropolish.
- Pinzas, etanol, guantes, secador para probetas.
- Reactivo empleado en Microscopía; Agua regia (25% de ácido Nítrico y 75% de ácido Clorhídrico) recomendado para aceros inoxidables en la norma ASTM 112.
- Reactivo empleado en Macroscopía; solución compuesta por 50mL de ácido Clorhídrico y 25mL de sulfato cúprico (CuSO_4) en agua (H_2O) bajo especificaciones de la norma ASTM 340.
- Disco abrasivo para corte de probetas.
- Microscopio electrónico, marca Unión (figura 3.12).



Figura 3.12. Microscopio electrónico disponible en el Laboratorio de Materiales de la facultad de ingeniería.

Procedimiento del ensayo.

- Se realizó el desbaste grueso con la desbastadora de cintas, con cintas de lijas de grano 80, 120 y 240. Con esto se busca formar una superficie plana para el estudio.
- Se elaboró el desbaste fino con la máquina Ecomet II con lijas de sección circular de granos 400, 500, 600 y 1200.
- Se llevaron las muestras ya desbastadas al banco de pulido, en el mismo se realiza un pulido grueso y un pulido fino, con alúmina gruesa y fina respectivamente.
- Se realizó el ataque químico a las probetas para microscopía, este paso se efectúa atacando por inmersión la superficie finamente pulida con una solución de Agua regia por un período de 5 segundos (especificaciones de la norma ASTM E-112), luego lavar con abundante agua y rociar con etanol para secarlas con aire.
- Se realizó el ataque químico a las probetas para macroscopía en la superficie finamente desbastada por un período de 15 segundos, según especificaciones de la norma ASTM E-340, para luego lavar con abundante agua y rociar con etanol para secarlas con aire. Con este método se logró la medición de las características más importantes de la soldadura como ancho del cordón y penetración.

3.7.6. Análisis de los Datos Obtenidos.

Los datos obtenidos como resultado de los ensayos antes expuestos se analizaron, por separado y se estableció comparaciones entre las probetas expuestas, las no expuestas a la corrosión y en otro caso con probetas del material base, con el fin de determinar la variación de las variables de trabajo (propiedades mecánicas) entre las muestras ensayadas.

CAPÍTULO 4

Resultados experimentales y sus respectivos análisis

A continuación se presentaran todos los resultados que se obtuvieron de los procedimientos experimentales llevados a cabo para el estudio de la corrosión en el material y sus juntas soldadas así como los análisis realizados en base a estos resultados.

4.1. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL BASE EN ESTUDIO.

La caracterización del material comprenderá en primer lugar el estudio de sus propiedades mecánicas y en segundo lugar, la descripción de su microestructura mediante la observación metalográfica.

4.1.1. Propiedades mecánicas.

Para la caracterización del material se hallan los valores de sus propiedades mecánicas. Dichos valores se extraen del diagrama esfuerzo-deformación obtenido mediante las ecuaciones 2.1 y 2.2 del capítulo 2. La curva promedio de cada una de las probetas ensayadas para llevar a cabo la caracterización del material se ilustra a continuación en la figura 4.1.

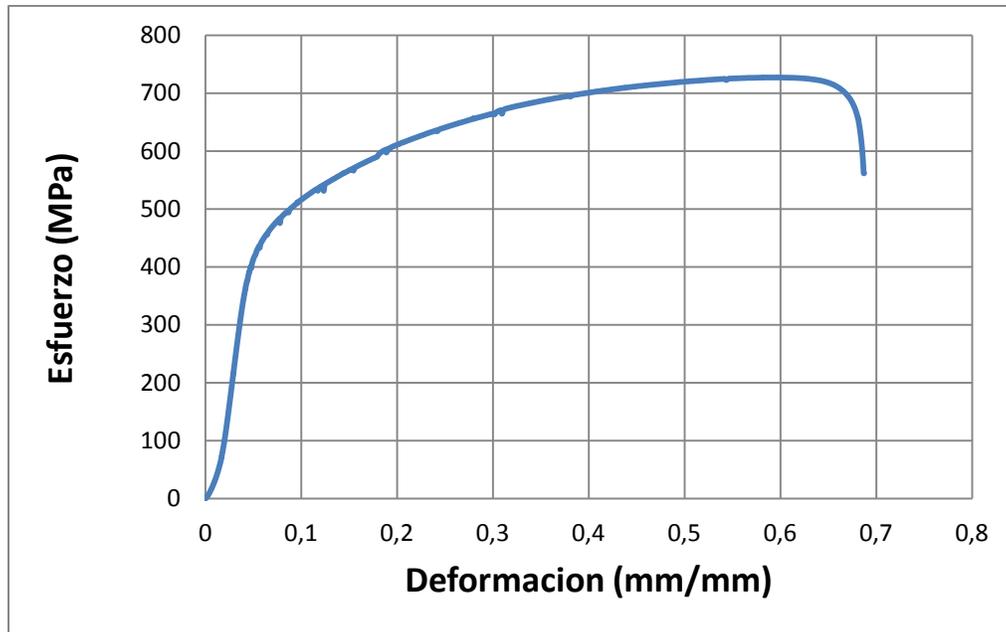


Fig. 4.1. Diagrama esfuerzo-deformación promedio de las probetas sin soldadura.

Se procede al cálculo del esfuerzo de fluencia hallado mediante la relación planteada en la Ley de Hooke, aplicando la conversión del 0,2% de la deformación como se puede observar en la figura 4.2.

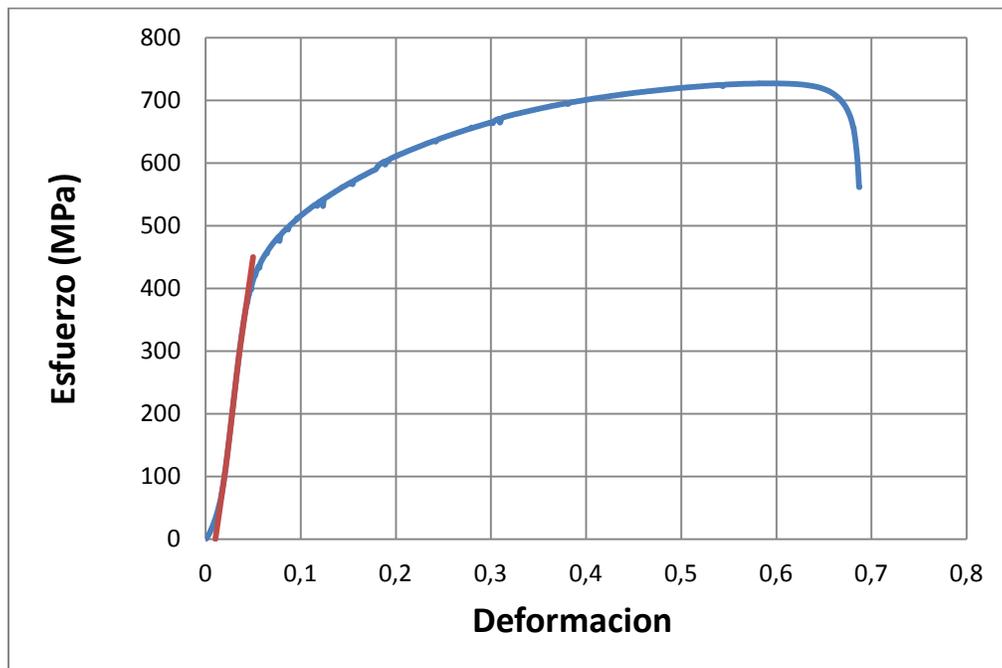


Fig. 4.2. Línea de tendencia de la zona plástica del diagrama esfuerzo-deformación promedio de las probetas sin soldadura.

Tabla 4.1. Valores característicos de cada probeta sin soldadura

| Propiedades Mecánicas | P1 | P2 | P3 | P4 |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Esfuerzo de Fluencia (MPa) | 380,19 | 330,59 | 349,64 | 320,59 |
| Esfuerzo de tracción (MPa) | 749,91 | 735,43 | 727,01 | 719,45 |
| Esfuerzo de Ruptura (MPa) | 547,08 | 578,19 | 545,35 | 575,08 |
| e (%) | 69,61 | 68,74 | 67,83 | 68,59 |

Como se puede observar en la grafica, el esfuerzo de fluencia promedio de los esfuerzos obtenidos en las 4 probetas ensayadas es:

$$S_y = \frac{380,19 + 330,59 + 349,64 + 320,59}{4} = 345,25MPa$$

Y arroja una desviación estándar de 26,22 MPa.

Ademas se calculan los valores correspondientes a las otras propiedades mecánicas que se pueden obtener del diagrama como el caso del esfuerzo máximo o esfuerzo de tracción que se extrae directamente de la gráfica. Dado que se ensayaron 4 probetas, al igual que para el caso anterior se halla el promedio de los valores obtenidos de los ensayos realizados para obtener un valor estándar:

$$S_u = \frac{747,91 + 735,43 + 727,01 + 719,45}{4} = 732,45MPa$$

Con una desviación estándar de 15,46 MPa.

De igual manera se procede para el cálculo del esfuerzo de ruptura o fractura.

$$S_f = \frac{547,08 + 578,19 + 545,35 + 575,08}{4} = 561,42MPa$$

Con una desviación estándar de 16,77 MPa.

A continuación se calcula el porcentaje de deformación o elongación para la primera probeta ensayada para luego el promedio de los valores hallados en todas las probetas. El valor de elongación se extrae de la gráfica directamente para hallar el porcentaje:

$$\% e = 0,6869 \times 100 = 68,69 \%$$

El valor del porcentaje de elongación se puede obtener también midiendo directamente sobre las probetas ensayadas con la ecuación 2.2 definida en el capítulo 2. El cálculo de este valor para la probeta N1 se muestra a continuación:

$$\% e = \frac{L_f - L_o}{L_o} \times 100 = \frac{83,5 - 50,8}{50,8} \times 100 = 64,37 \%$$

$$\% e = \frac{64,37 + 67,95 + 65,31 + 71,65}{4} = 67,32 \%$$

Como se evidencia en los valores de elongación obtenidos anteriormente no existe una diferencia significativa entre el porcentaje de elongación que se extrae de la gráfica y el porcentaje de elongación calculado con las medidas tomadas directamente de las probetas por lo que se verifica la exactitud en los valores que arroja la gráfica.

El valor de la resiliencia y la tenacidad para la probeta N1 se hayan con las ecuaciones 2.4 y 2.5 y se muestran a continuación respectivamente:

$$U_{R1} = \frac{1}{2} \times \frac{380,19N}{mm^2} \times \frac{1000000mm^2}{1m^2} \times \frac{0,042m}{m} = 7996,85KJ/m^3$$

$$U_R = \frac{7996,85 + 5928,5 + 7037,65 + 5361,05}{4} = 6581,01KJ/m^3$$

$$U_{T1} = \frac{\frac{380190KN}{m^2} + \frac{735433KN}{m^2}}{2} \times 0,69 \frac{m}{m}$$

$$U_{T1} = 375074,59 \text{KJ/m}^3$$

$$U_T = \frac{375074,59 + 401625,66 + 369831,22 + 366614,29}{4} = 378286,44 \text{KJ/m}^3$$

Tabla 4.2. Propiedades mecánicas del material en estudio.

| Propiedades Mecánicas | Promedio | Desviación Estándar |
|---------------------------------------|-----------|---------------------|
| Esfuerzo de Fluencia (MPa) | 345,25 | 26,22 |
| Esfuerzo de tracción (MPa) | 732,45 | 11,9 |
| Esfuerzo de Ruptura (MPa) | 561,42 | 16,77 |
| e (%) | 70,2 | 1,4 |
| RA (%) | 59,81 | 2,36 |
| Resiliencia (KJ/m³) | 6581,01 | 1172,91 |
| Tenacidad (KJ/m³) | 378286,44 | 15945,37 |

4.1.2. Caracterización metalográfica.

A continuación en la figura 4.3, 4.4 y 4.5, muestran las micrografías del material base a diferentes aumentos.

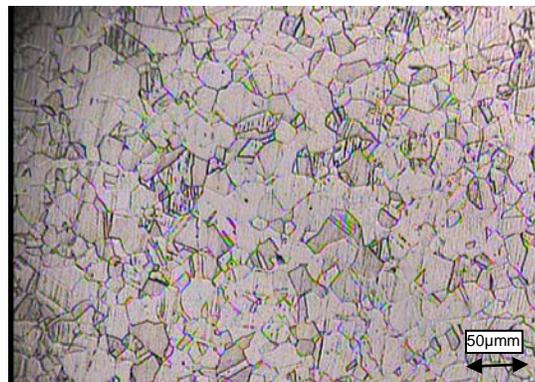


Fig. 4.3. Muestras observadas por microscopía óptica a 200X.

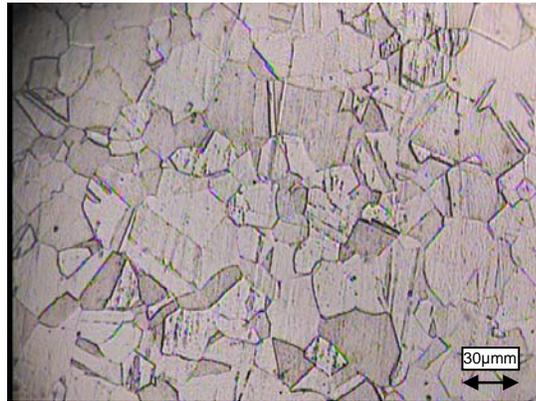


Fig. 4.4. Muestras observadas por microscopia óptica a 400X.

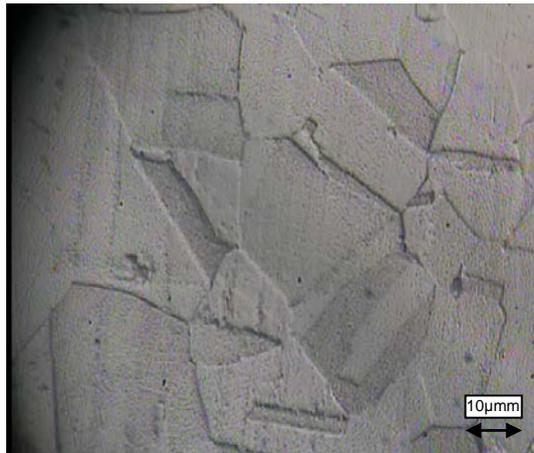


Fig. 4.5. Muestras observadas por microscopia óptica a 1000X.

En las figuras 4.3 y 4.4 se puede apreciar la microestructura austenítica (zona clara) de este acero caracterizada por granos equiaxiales de forma poligonal así como la presencia de algunos granos de martensita (zona oscura) producto del laminado en frío del acero cuando se fabrica que permite la difusión de la ferrita en capas de cementita. Es evidente además la presencia de maclas (ver figura 4.5) producto igualmente del recocido del material al momento de fabricarse.

4.1.3. Tamaño de grano.

El tamaño de grano se puede apreciar en la figura 4.6 que ilustra una micrografía a 100X. En la que se puede apreciar granos de tamaño 7 según la clasificación ASTM lo que indica la cantidad de 64 granos/in² con un diámetro nominal aproximado de 0,0359mm.

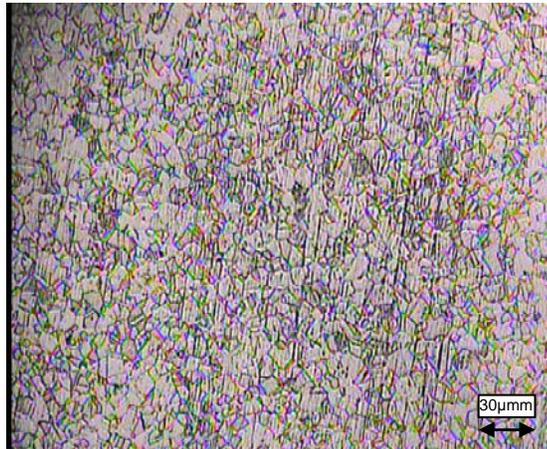


Fig. 4.6. Muestras observadas por microscopía óptica a 100X.

4.2. Caracterización de las juntas soldadas.

A continuación se ilustraran tanto las propiedades mecánicas obtenidas como las características metalográfica de las probetas que fueron soldadas.

4.2.1. Propiedades mecánicas.

Para la evaluación de las juntas soldadas primero se caracterizó las probetas que no fueron sometidas al ensayo de niebla salina para luego relacionar los resultados teniendo como criterio las diferencias entre los valores de sus propiedades mecánicas.

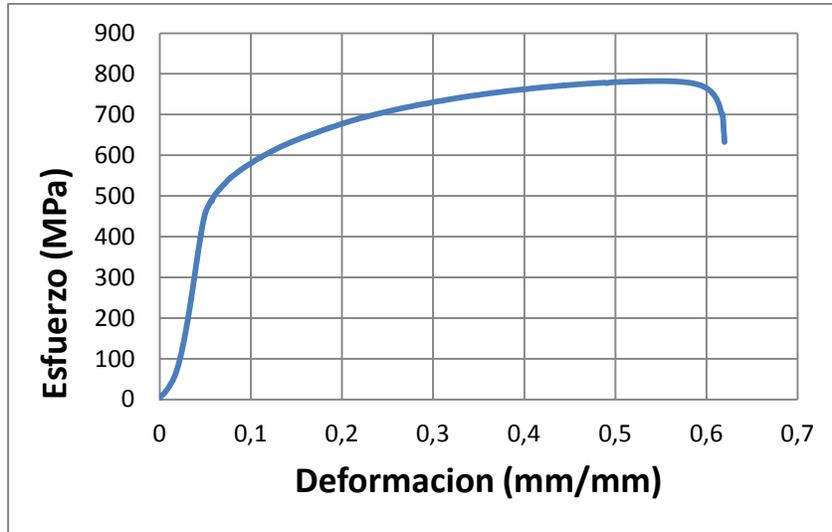


Fig. 4.7. Diagrama esfuerzo-deformación promedio de las probetas soldadas.

Tabla 4.3. Valores característicos de cada probeta soldada.

| Propiedades Mecánicas | P1 | P2 | P3 | P4 |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Esfuerzo de Fluencia (MPa) | 438,97 | 439,37 | 438,77 | 419,52 |
| Esfuerzo de tracción (MPa) | 791,53 | 761,92 | 782,24 | 754,29 |
| Esfuerzo de Ruptura (MPa) | 662,59 | 620,94 | 698,07 | 537,71 |
| e (%) | 64,34 | 69,32 | 61,96 | 57,94 |

Tabla 4.4. Propiedades mecánicas de las probetas soldadas.

| Propiedades Mecánicas | Promedio | Desviación Estándar |
|----------------------------------|-----------|---------------------|
| Esfuerzo de Fluencia (MPa) | 434,16 | 9,76 |
| Esfuerzo de tracción (MPa) | 772,5 | 17,32 |
| Esfuerzo de Ruptura (MPa) | 629,83 | 69,02 |
| e (%) | 63,39 | 4,75 |
| RA (%) | 55,24 | 2,13 |
| Resiliencia (KJ/m ³) | 11406,87 | 1683,33 |
| Tenacidad (MJ/m ³) | 382669,72 | 32358,59 |

La variación de las propiedades mecánicas entre las probetas soldadas y las probetas sin soldadura se debe al calentamiento que se experimenta durante el proceso de soldadura que dan lugar al endurecimiento del material lo que en este caso en particular contribuye al incremento de estos valores así como a la diferencia entre las propiedades del material base y el material de aporte.

El material de aporte hace que disminuya el porcentaje elongación para las probetas soldadas y como consecuencia de esta disminución y el aumento en el esfuerzo de fluencia aumenta el valor de la resiliencia para las probetas soldadas. Por su parte la tenacidad no experimenta un cambio significativo debido a que el aumento en el esfuerzo de tracción es proporcional al decremento en el porcentaje de deformación.

4.2.2. Caracterización metalográfica.

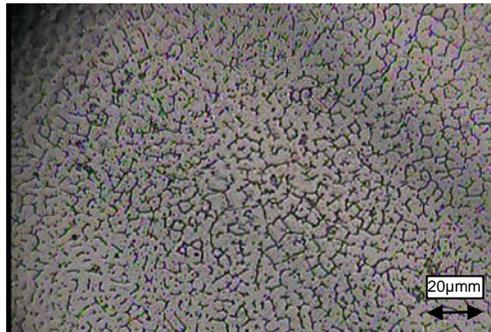


Fig. 4.8. Cordón de soldadura observado por microscopía óptica a 200X.

El material de aporte del electrodo es de carácter austenítico, el cordón de soldadura muestra una microestructura de fase sigma en los límites de grano y precipitado de carburos de cromo producto del calentamiento del material en el proceso de soldadura. En algunos casos se pudo apreciar en la estructura la aparición de ferrita proeutectoide como se ilustrara en la figura 4.9.



Fig. 4.9. Ferrita proeutectoide observada por microscopia óptica a 100X.



Fig. 4.10. Línea de fusión observada por microscopia óptica a 200X.

En la imagen 4.10 se puede apreciar una morfología variada constituida por dos tipos distintos de estructura. Una estructura equiaxial austenítica en el material base con algunos granos martensíticos y precipitaciones de carburos de cromo en los límites de grano de una matriz de fase sigma en el cordón de soldadura. Además se visualiza una zona intermedia afectada por el calor de la soldadura, constituida por láminas de cementita en una matriz ferrítica. La variación en la orientación y en las formas de las estructuras se debe a las distintas velocidades de solidificación presentes en el proceso de soldadura que no permiten solubilizar una estructura totalmente austenítica.

4.2.3. Tamaño de grano.

Se percibe un incremento en el tamaños de grano del material base a medida que la zona está más alejada al cordón de soldadura que varía desde clasificación ASTM 5 a 8, como se puede observar en la figura 4.11.

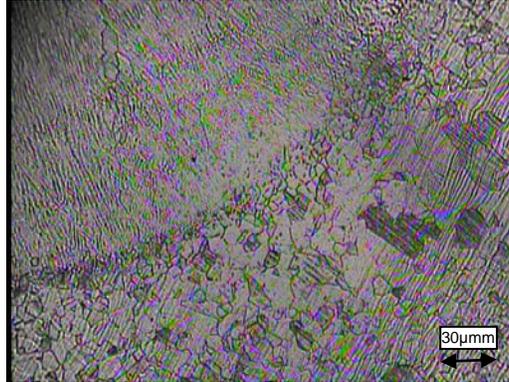


Fig. 4.11. Variación del tamaño de grano observada por microscopía óptica a 100X.

Esto es consecuencia de la variación de temperaturas que se presenta en determinadas zonas de la probeta. Esto implica que mientras en algunas zonas la estructura cristalina del grano esta por romperse, en otra se está finalizando la recrystalización.

4.3. Evaluación del efecto de la corrosión en las juntas soldadas mediante el ensayo de tracción.

4.3.1. Probetas soldadas expuestas a corrosión por un periodo de 48 horas.

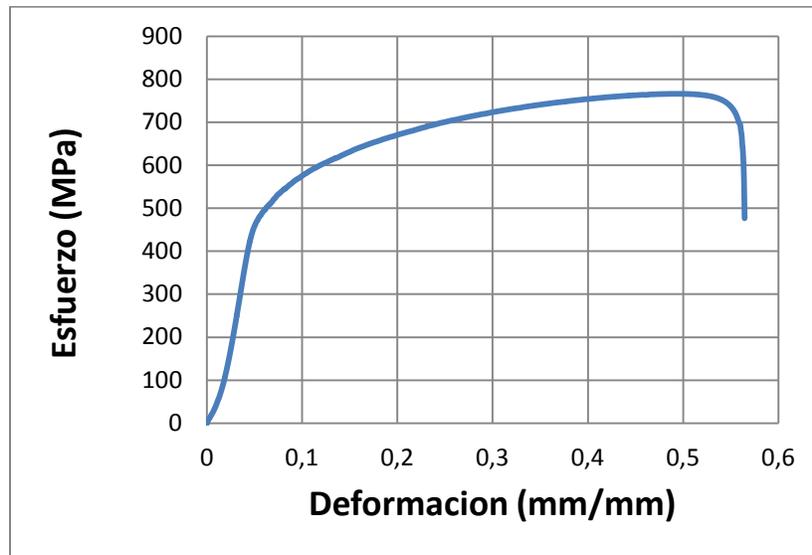


Fig. 4.12. Diagrama esfuerzo-deformación promedio de las probetas soldadas sometidas a corrosión por 48 horas.

Tabla 4.5. Valores característicos de cada probeta soldada sometida a corrosión por 48 horas.

| Propiedades Mecánicas | P1 | P2 | P3 | P4 |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Esfuerzo de Fluencia (MPa) | 424,01 | 419,33 | 421,53 | 412,16 |
| Esfuerzo de tracción (MPa) | 795,98 | 765,98 | 779,52 | 753,42 |
| Esfuerzo de Ruptura (MPa) | 650,70 | 586,49 | 583,54 | 578,14 |
| e (%) | 69,03 | 58,45 | 59,98 | 65,20 |

Tabla 4.6. Propiedades mecánicas de las probetas soldadas expuestas a corrosión por 48 horas.

| Propiedades Mecánicas | Promedio | Desviación Estándar |
|----------------------------|----------|---------------------|
| Esfuerzo de Fluencia (MPa) | 419,26 | 5,1 |
| Esfuerzo de tracción (MPa) | 773,48 | 17,87 |
| Esfuerzo de Ruptura (MPa) | 599,72 | 34,16 |
| e (%) | 61,17 | 4,8 |

4.3.2. Probetas soldadas expuestas a corrosión por un periodo de 96 horas.

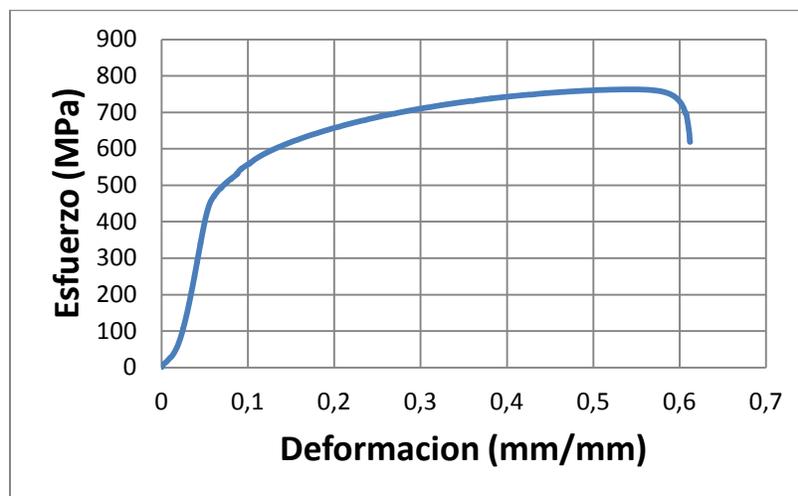


Fig. 4.13. Diagrama esfuerzo-deformación promedio de las probetas soldadas sometidas a corrosión por 96 horas.

Tabla 4.7. Valores característicos de cada probeta soldada sometida a corrosión por 96 horas.

| Propiedades Mecánicas | P1 | P2 | P3 | P4 |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Esfuerzo de Fluencia (MPa) | 424,01 | 419,33 | 421,53 | 412,16 |
| Esfuerzo de tracción (MPa) | 769,68 | 762,83 | 715,74 | 770,07 |
| Esfuerzo de Ruptura (MPa) | 615,23 | 619,01 | 559,80 | 594,17 |
| e (%) | 65,02 | 61,20 | 60,03 | 64,25 |

Tabla 4.8. Propiedades mecánicas de las probetas soldadas expuestas a corrosión por 96 horas.

| Propiedades Mecánicas | Promedio | Desviación estándar |
|-----------------------------------|----------|---------------------|
| Esfuerzo de Fluencia (MPa) | 412,27 | 4,45 |
| Esfuerzo de tracción (MPa) | 754,58 | 26,1 |
| Esfuerzo de Ruptura (MPa) | 597,05 | 27,13 |
| e (%) | 62,62 | 2,39 |

4.3.3. Probetas soldadas expuestas por un periodo de 168 horas.

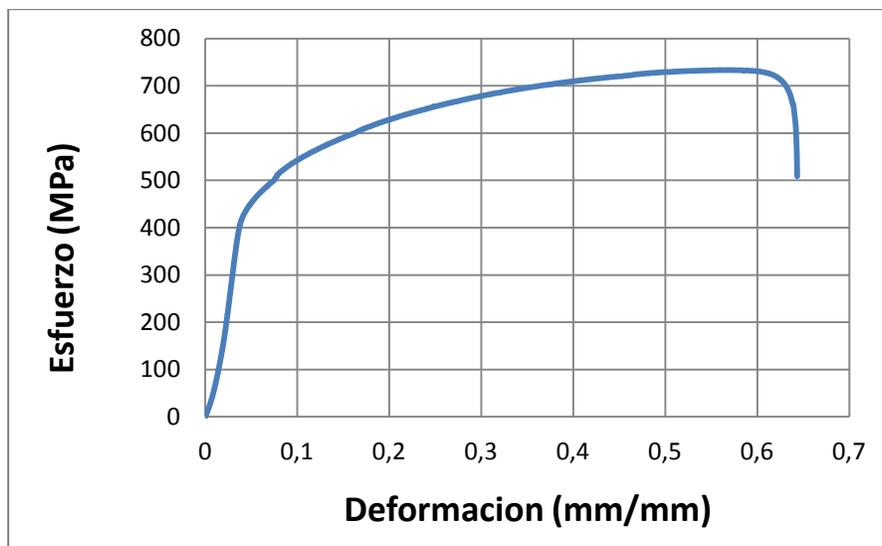


Fig. 4.14. Diagrama esfuerzo-deformación promedio de las probetas soldadas sometidas a corrosión por 168 horas.

Tabla 4.9. Valores característicos de cada probeta soldada sometida a corrosión por 168 horas.

| Propiedades Mecánicas | P1 | P2 | P3 | P4 |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Esfuerzo de Fluencia (MPa) | 415,23 | 405,03 | 415,62 | 403,97 |
| Esfuerzo de tracción (MPa) | 738,35 | 736,07 | 743,70 | 737,16 |
| Esfuerzo de Ruptura (MPa) | 599,70 | 566,41 | 598,62 | 591,02 |
| e (%) | 62,38 | 61,39 | 64,33 | 63,51 |

Tabla 4.10. Propiedades mecánicas de las probetas soldadas expuestas a corrosión por 168 horas.

| Propiedades Mecánicas | Promedio | Desviación Máxima |
|----------------------------|----------|-------------------|
| Esfuerzo de Fluencia (MPa) | 409,97 | 6,32 |
| Esfuerzo de tracción (MPa) | 738,72 | 3,19 |
| Esfuerzo de Ruptura (MPa) | 588,94 | 15,50 |
| e (%) | 62,90 | 12,88 |

4.3.4. Probetas soldadas expuestas a corrosión por un periodo de 336 horas.

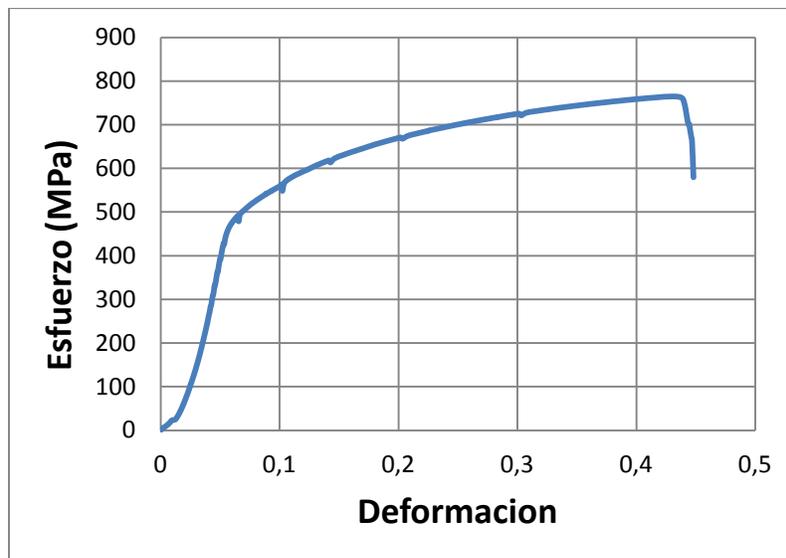


Fig. 4.15. Diagrama esfuerzo-deformación promedio de las probetas soldadas sometidas a corrosión por 336 horas.

Tabla 4.11. Valores característicos de cada probeta soldada sometida a corrosión por 336 horas.

| Propiedades Mecánicas | P1 | P2 | P3 |
|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Esfuerzo de Fluencia (MPa) | 381,02 | 379,13 | 401,41 |
| Esfuerzo de tracción (MPa) | 764,72 | 665,31 | 778,81 |
| Esfuerzo de Ruptura (MPa) | 648,14 | 479,88 | 579,61 |
| e (%) | 44,70 | 23,70 | 61,18 |

Tabla 4.12. Propiedades mecánicas de las probetas soldadas expuestas a corrosión por 336 horas.

| Propiedades Mecánicas | Promedio | Desviación estándar |
|-----------------------------------|-----------------|----------------------------|
| Esfuerzo de Fluencia (MPa) | 387,19 | 12,35 |
| Esfuerzo de tracción (MPa) | 736,28 | 61,86 |
| Esfuerzo de Ruptura (MPa) | 582,95 | 92,34 |
| e (%) | 43,19 | 18,78 |

Se puede observar que la mayoría de las probetas que fueron sometidas a corrosión durante un periodo de 336 horas rompieron en el cordón de soldadura debido a la formación de carburos de cromo en los bordes de grano que tiene como consecuencia la corrosión intergranular. Esto es producto de la heterogeneidad de la zona afectada por el calor donde se presenta una variación en el tamaño de grano.

A continuación se muestran en las gráficas correspondientes a las figuras 4.16, 4.17, 4.18 y 4.19 la comparación entre las propiedades mecánicas de las muestras sometidas a los distintos periodos de exposición.

81 Evaluación de las uniones soldadas realizadas con el proceso de soldadura por arco eléctrico del acero AISI 201 expuestas a ambientes marinos.

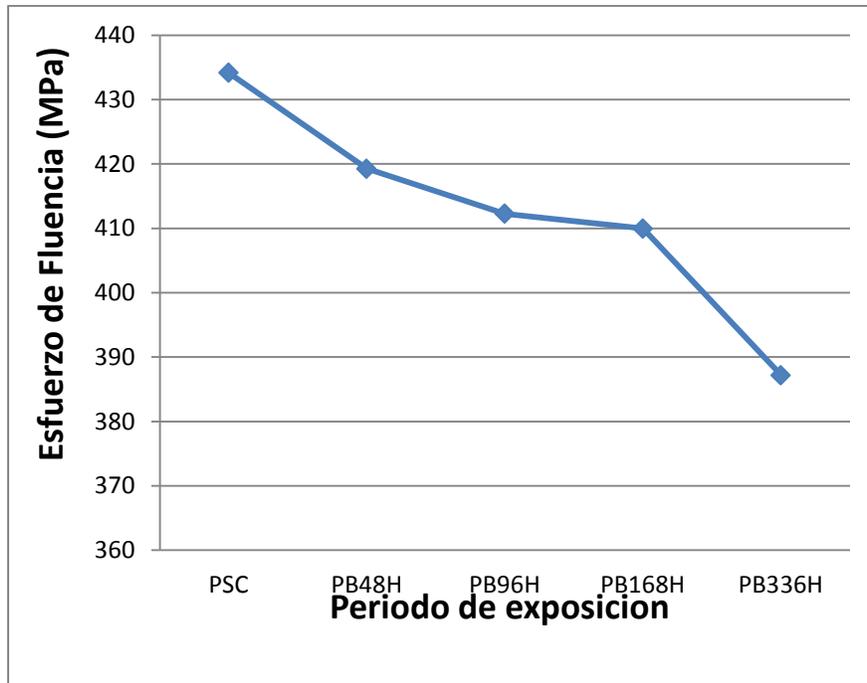


Fig. 4.16. Diagrama Esfuerzo de Fluencia-Periodo de exposición.

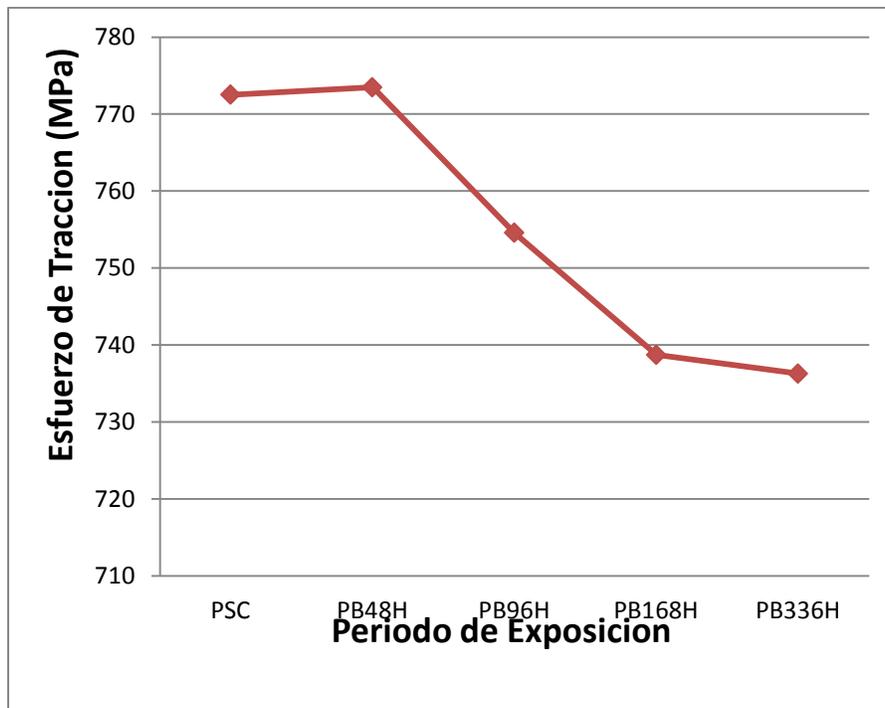


Fig. 4.17. Diagrama Esfuerzo de Tracción-Periodo de exposición.

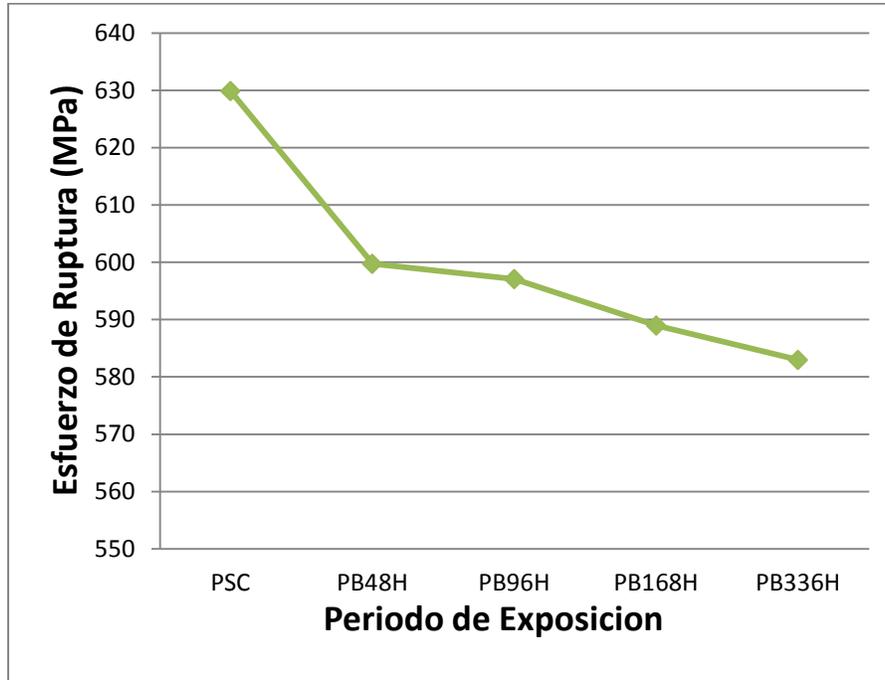


Fig. 4.18. Diagrama Esfuerzo de Ruptura-Periodo de exposición.

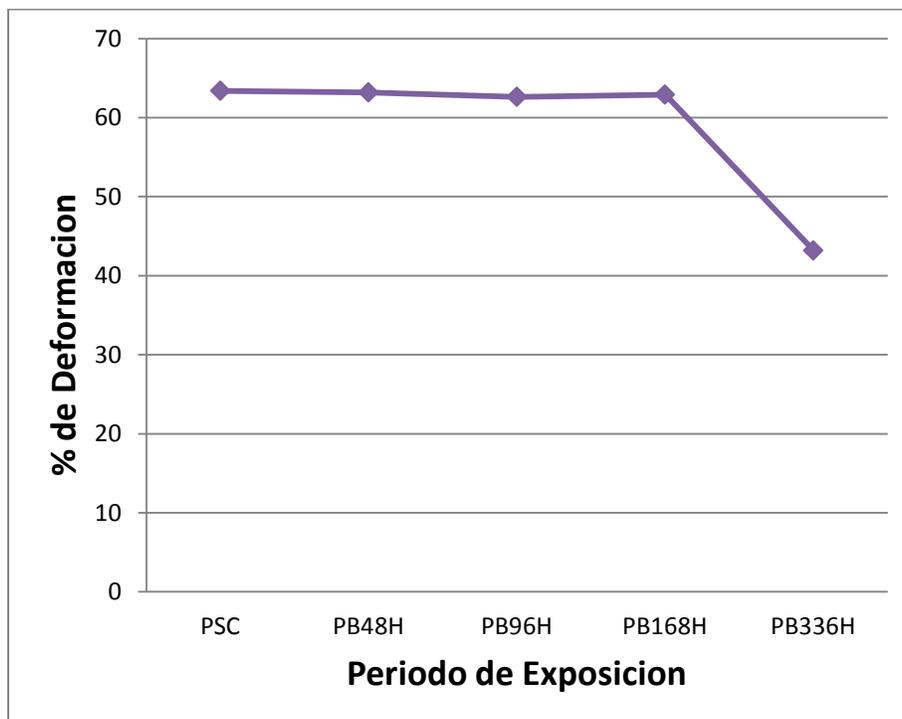


Fig. 4.19. Diagrama % de Deformación-Periodo de exposición.

El efecto negativo de la corrosión en las propiedades mecánicas del material se hace evidente dado que esfuerzos de fluencia, tracción y de fractura obtenidos tienen una tendencia decreciente a medida que es mayor el periodo de exposición a la corrosión. Por su parte el porcentaje de elongación tuvo variaciones despreciables con la excepción de las probetas que fueron expuestas a 336 horas en las que la corrosión afecta el cordón de soldadura.

4.4. Evaluación del efecto de la corrosión mediante el ensayo de doblado.

4.4.1. Ensayo de doblado en U.



Fig. 4.20. Probeta expuesta a corrosión durante 48 horas, doblada en U.



Fig. 4.21. Probeta expuesta a corrosión durante 96 horas, doblada en U.



Fig. 4.22. Probeta expuesta a corrosión durante 168 horas, doblada en U.



Fig. 4.23. Probeta expuesta a corrosión durante 336 horas, doblada en U.

Carga teórica:

$$F_{max} = Kd \frac{\sigma_u w t^2}{W} = 2 \frac{773,48 \frac{N}{mm^2} \times 50mm \times (2mm)^2}{15,2mm} = 9980,38N$$

Como se puede apreciar en las imágenes anteriores ninguna probeta mostró fallas o irregularidades debido al doblado.

Tabla 4.13. Resultados del ensayo de doblado en U.

| Tiempo de exposición (h) | Carga teórica (N) | Carga experimental (N) | Descripción |
|--------------------------|-------------------|------------------------|---|
| 48 | 9980,38 | 5664 | Cordón de soldadura centrado y no se aprecia agrietamiento, ni fisuras. |
| 96 | 9736,51 | 5598 | Cordón de soldadura levemente desplazado y una pequeña muesca en el extremo izquierdo de la zona doblada. No se aprecia agrietamiento ni fisuras. |
| 168 | 8866,32 | 5427 | Cordón de soldadura levemente desplazado y muescas en ambos extremos de la zona doblada. No se aprecia agrietamiento ni fisuras. |
| 336 | 9500,38 | 4823 | Cordón de soldadura centrado y muescas en ambos extremos de la zona doblada. No se aprecia agrietamiento ni fisuras. |

En los casos que se evidencian muescas en los extremos de la zona doblada es consecuencia de la falta de penetración del cordón de soldadura en dicha zona. El hecho que no aparezcan fisuras o grietas en la soldadura indica un alto grado de ductilidad en el cordón a pesar del efecto que pueda tener la corrosión en las zonas donde se funde el material de aporte con el material base producto de la acumulación de solución salina; esto es evidenciado anteriormente en los resultados de los ensayos de tracción.

La diferencia entre la carga teórica y experimental debe a que la ecuación teórica fue determinada de manera empírica, por lo que tendrían que simularse las mismas condiciones bajo las cuales se halló la ecuación para obtener valores cercanos. Los valores de carga van disminuyendo a medida que aumenta el período de exposición a la corrosión debido a la disminución de la ductilidad en el material.

4.4.2. Ensayo de doblado al aire.

A continuación se ilustra como ejemplo al cálculo de la carga teórica de la probeta N 1 expuesta a 48 horas mediante el uso de la ecuación 2.12 ilustrada en el capítulo 2.

En este tipo de ensayo es necesario hallar el valor del esfuerzo de fluencia de la fibra externa tomando en cuenta el endurecimiento por deformación que experimentan los aceros en general. Los valores del coeficiente de resistencia y del exponente de endurecimiento se extraen de la grafica en coordenadas bi-logarítmicas de esfuerzo y deformación real en la zona plástica.

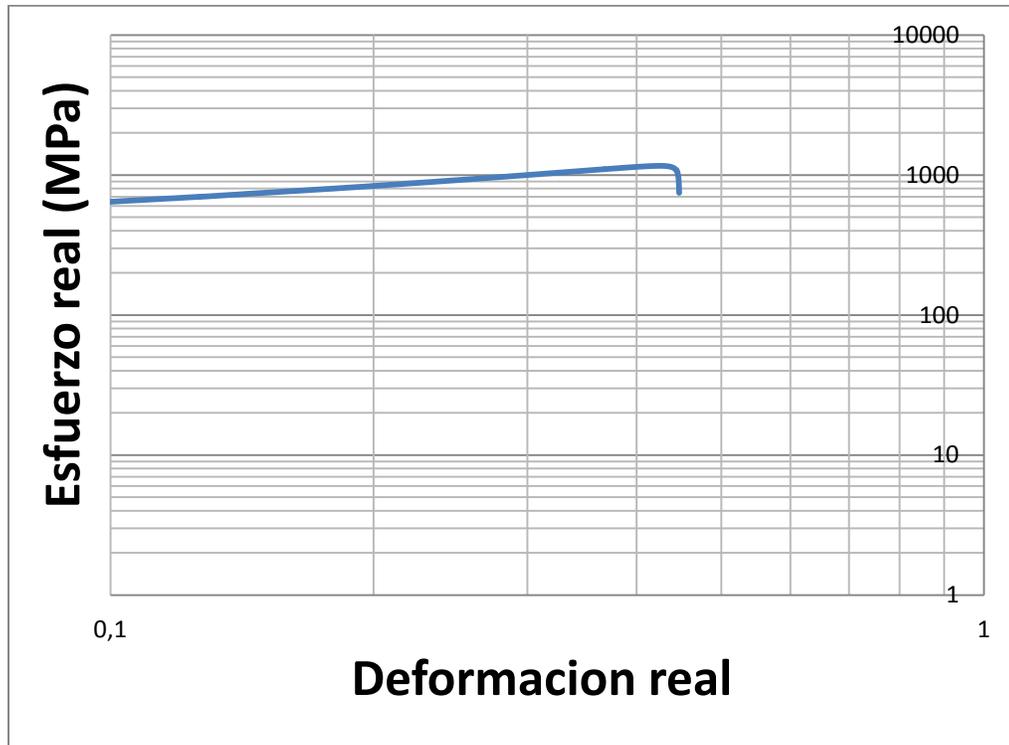


Fig. 4.24. Representación en escala bi-logarítmica de la curva esfuerzo-deformación verdadera.

Tabla 4.14. Valores de K y n. Ley de Hollomon.

| Tiempo de exposición (h) | K (MPa) | n |
|--------------------------|---------|------|
| 48 | 1949,84 | 0,96 |
| 96 | 1862,08 | 0,96 |
| 168 | 1819,70 | 0,95 |
| 336 | 1778,27 | 0,95 |

$$\sigma_e = K(\ln\sqrt{1 + t/R})^2 = 282800,39 \frac{lbf}{in^2} \left[\ln \sqrt{1 + \frac{0,078in}{0,15in}} \right]^2 = 274995,09Psi$$

$$F = \frac{1,96 \times (0,078)^2 \times 274995,09lbf/in^2 \times \cos 60(\cos 60 + 0,57\text{sen}60)}{0,59 - 2(0,15in + 0,078in)\text{sen}60 + 0,57(0,078in\cos 60)}$$

$$F = 7496,56lbf = 33346,36N$$

Además se calcula el factor de recuperación elástica de las probetas dobladas al aire para evaluar la influencia de la corrosión en las mismas. A continuación se muestra el cálculo del factor para la probeta expuesta a corrosión por 48 horas.

$$K_{s48} = \frac{\alpha_f}{\alpha_o} = \frac{57,5^\circ}{60^\circ} = 0,95$$

Tabla 4.15. Resultados del ensayo de doblado al aire.

| Tiempo de exposición (h) | Carga teórica (N) | Carga experimental (N) | Angulo final de doblado (°) | Factor de recuperación elástica |
|---------------------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------------------------|--|
| 48 | 33111,22 | 6309 | 53°30' | 0,89 |
| 96 | 31846,15 | 6086 | 54°38' | 0,91 |
| 168 | 31120,21 | 5590 | 57°5' | 0,95 |
| 336 | 30412,92 | 5700 | 57°30' | 0,95 |

La enorme diferencia entre la carga teórica y la experimental se debe a desperfectos en la matriz de doblado. Dicha matriz tendía a aumentar la distancia entre los soportes a medida que la fuerza ejercida era mayor por lo que las cargas experimentales disminuyeron considerablemente. Este fenómeno se presentó igualmente en el doblado en “U” pero de manera menos significativa debido a que al final del proceso de doblado la carga tiende a disminuir una vez que cede el material cuando se encuentra dentro de la matriz. Al igual que la carga en el doblado en “U” estos valores van disminuyendo a medida que el periodo de corrosión fue mayor.

Se puede notar además que el factor de recuperación elástica K es mayor a medida que aumenta el periodo de exposición producto del decremento en el ángulo final de doblado, lo que quiere decir que el material pierde propiedades elásticas a medida que es atacado por la corrosión.

CAPITULO 5

Conclusiones y Recomendaciones.

5.1 CONCLUSIONES.

- La caracterización del material arrojó resultados cercanos o similares a los valores que han arrojado otras investigaciones tanto a nivel de sus propiedades mecánicas como de su estudio metalográfico.
- El proceso de soldadura origina variaciones en las propiedades mecánicas de las probetas con respecto al material base, evidenciadas en el aumento del esfuerzo de fluencia y el esfuerzo de tracción, así como la resiliencia, lo que supone la mejora de su potencial elástico a pesar de disminuir su ductilidad.
- La microestructura austenítica de las juntas soldadas no se ve afectada por el calor de la soldadura y se diferencia notablemente su forma equiaxial.
- Se presenta una variación en el tamaño de grano en el material base con una tendencia a aumentar a medida que la zona se aleja del cordón de soldadura.
- Fue evidente la resistencia a la corrosión del material base sin embargo se puede apreciar el efecto negativo que tiene en las probetas

soldadas traducido en la disminución en su ductilidad reflejado en la pérdida de propiedades mecánicas.

- Los cordones de soldadura no presentan grietas ni otro tipo de irregularidades lo que permite deducir que los ensamblajes realizados de esta manera contarían con buena ductilidad y permite pensar en la buena soldabilidad del acero mediante el procedimiento utilizado.

- El efecto de la corrosión trae como consecuencia en primer lugar la pérdida de propiedades mecánicas como la ductilidad traducido en la disminución de la carga necesaria en el ensayo de doblado, y en segundo lugar, un efecto negativo en las propiedades elásticas que se evidencia en la menor recuperación elástica que experimentan las probetas dobladas al aire.

- El material base no se vió afectado por el efecto de la corrosión a nivel macroscópico a pesar de apreciarse corrosión localizada en forma de óxido en el material fundido.

- No se presenta ningún efecto perjudicial de la corrosión en la mayoría de las probetas, inclusive para las que fueron sometidas a 168 horas de exposición. Sin embargo en las probetas que fueron expuestas a 336 horas se pudo apreciar la presencia de óxido en el cordón de soldadura o sea, “corrosión localizada” que posteriormente se comprobaría con la fractura de algunas probetas en dicho cordón.

5.2 RECOMENDACIONES.

- Utilizar mayores períodos de exposición para poder obtener un mejor criterio de evaluación debido a la alta resistencia del material a degradarse por efecto de la corrosión.
- Ensayar mayor cantidad de probetas en el ensayo de doblado para evaluar la repetibilidad de los valores de recuperación elástica.
- Incluir en el estudio del acero, la evaluación de la dureza del material con el fin de encontrar una relación de ductilidad con respecto a la fragilidad y corroborar el endurecimiento que experimentan las probetas por el efecto del proceso de soldadura.
- Realizar un estudio similar a probetas soldadas bajo otro proceso de soldadura con la intención de determinar su resistencia a la corrosión y establecer la correspondiente comparación.

ESPECIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (EPS) Si
PRECALIFICADO CALIFICADO POR ENSAYO

Nombre de la empresa: UNIVERSIDAD DE CARABOBO.
 Proceso de soldadura: SMAW.

Revisión por: Prof. Luis Sidorovas. Fecha: 06/12/2010
 Autorizado por: Prof. Luis Sidorovas. Fecha: 06/10/2010

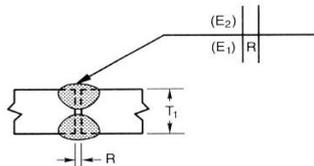
DISEÑO DE JUNTA

Tipo: Junta a Tope
 Soldadura de un solo lado
 Soldadura en ambos lados

Respaldo: Si No
 Material de Respaldo:

Abertura de raíz 1mm Dimensión del Talón _____
 Angulo del Bisel _____ Radio (J-U) _____

Repelado de Raíz: Si No Método _____



METALES BASE

Espec. Del Material: Acero Inoxidable.
 Tipo o Grado: AISI 201
 Espesor: 2mm.

METALES DE APORTE

Especificación IRAM(o AWS) SFA-5-4
 Clasificación IRAM(o AWS) E 308L-16

PROTECCIÓN

Fundente: Clasificación:
 Gas: Composición:

Velocidad del Flujo:
 Diámetro de la Tobera :

PRECALENTAMIENTO

Temp. de precalentamiento, Mín _____
 Temp. entre pasadas, Mín _____ Max _____

Tipo – Manual
 Semi – Automática
 Automática

POSICIÓN

Posición del Bisel: Filete _____
 Progresión Vertical: Ascendente Descendente

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS

Modo de Transferencia (GMAW)
 Corto circuito
 Globular
 Spray

Corriente: CA CCEB CEN Pulsante
 Otro _____
 Electrodo de Tungsteno (GTAW)

Tamaño: _____

Tipo: _____

TÉCNICA

Cordón rectilíneo u oscilante: rectilíneo
 Pasada múltiple o Pasada única (por lado): única
 Número de Electrodo _____
 Espaciado de Electrodo Longitudinal _____
 Lateral _____
 Angulo _____

Distancia del tubo de contacto a la pieza _____
 Limpieza entre pasadas _____

TRATAMIENTO TÉRMICO POSTERIOR A LA SOLDADURA

Temp. _____
 Tiempo _____

PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

| Pasada o capa(s) de Soldadura | Proceso | Metal de Aporte | | Corriente | | Tensión V | Velocidad de Avance mm/ s | Detalles de la Junta |
|-------------------------------|---------|-----------------|----------|-------------------|---|-----------|---------------------------|----------------------|
| | | Clase | Diámetro | Tipo y Polaridad | Amperes o Velocidad de Alimentación del Alambre | | | |
| 1 | SMAW | E 308L-16 | 2.5mm | Polo positivo (+) | 50-75 | 220 | | Junta a tope B-P1b |

Referencias Bibliográficas.

• Almenara M., Rosales A., Vidal J., Muñoz P., Payeres M. (2008) *Influencia a la soldadura SAW sobre la resistencia a la corrosión de aceros Dúplex*. Departamento de Mecánica. Universidad Simón Bolívar. Caracas, Venezuela.

• Affaqui J., Yopez A., (2009). *Adecuación tecnológica y puesta en funcionamiento de una cámara de niebla salina para ensayos de corrosión atmosférica*. Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo.

• Affaqui J., Yopez A., (2009). *Procedimiento para el funcionamiento de la Cámara de Niebla Salina*. Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo. Venezuela.

• Aparicio Gennifer. *Guía para laboratorio de Procesos de Fabricación I*. Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo. Venezuela.

• Aular L., Fernández Nelson., (2009). *Evaluación de la recuperación elástica en el proceso de doblado en V en función del porcentaje de carbono y el espesor de chapa en aceros estructurales*. Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo. Venezuela.

• Ávila I., Genescá C., (1987). *Más allá de la Herrumbre*. Biblioteca digital, La Ciencia Para todos, Fondo de Cultura Económica, S. A. DE C. V. Chile

• ASTM B-117, (1997). Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus.

• ASTM E-3, (1995). Preparation of Metallographic Specimens.

• ASTM E-8, (1998). Test Methods for Tension Testing of metallic materials.

• ASTM E-112, (1996). Standard Test Methods for Determining Average Grain Size.

- ASTM E-190 (1992). Standard Test Method for Guided Bend Test for Ductility of Welds.

- ASTM E-290 (1997). Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility.

- ASTM E-340, (1998). Standard Test Method for Macroetching Metals and Alloys.

- ASTM G-39, (1994). Preparation and use of bent-beam Stress-Corrosion Test Specimens.

- Baltazar M., Almeraya F., Nieves D., Birunda A., Maldonado E., Ortiz A. (2007) *Corrosión del acero inoxidable 304 como refuerzo en concreto expuesto a cloruros y sulfatos. Universidad Tecnológica de Pereira.* ISSN 0120-1701. No 36.

- Barrios Y., (2003). *Manual de trabajos de Grado de Especialización y Maestría y Tesis Doctorales.* Universidad Pedagógica Experimental Libertador UPEL. Vicerrectorado de Investigación y Postgrado. Venezuela.

- *Boletín técnico para la denominación de los materiales,* (2009). Empresa Turbo-cobre. Disponible en:

http://www.electroindustria.com/nuevo/productos/cambre/cambre_boletines.pdf

- Cabello S. *Tópicos sobre conformado de metales.* Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, Venezuela.

- Cortez R., Villanueva J., Ponce E., Rojas M., Rojas E (2004). *Estudio de la soldabilidad y corrosión del acero inoxidable 904L con los agentes utilizados en la lixiviación de cobre.* Revista de la Facultad de Ingeniería. U.T.A. Chile.

- *Determinación de las propiedades mecánicas en tracción a materiales en estado de entrega.* Manual para ensayos. Disponible en:

<http://aulavirtual.ing.uc.edu.ve/file.phpfile>

- Iriza C. (2008). *Manual de prácticas de Laboratorio de Materiales.* Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo.

- Machado N., Ojeda R., (2005). *Rediseño de una cámara de niebla salina para ensayos de corrosión de corrosión atmosférica*. Facultad de ingeniería. Universidad de Carabobo.

- Manual de soldadura y catalogo de productos. Empresa OERLIKON. Disponible en:

<http://www.oerlikon.es/es/documentacion/manual-mma-tig-welding.html>

- Pereira J. (2004). *Procesos de Fabricación por arranque de viruta*. Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela.

- Polo Sanz, José Luis. *Estudio de la corrosión del acero 316L en las regiones pasivas y de picadura*. *Revista de metalurgia*, ISSN 0034-8570, [Vol. 35, Nº 6, 1999](#).

- Rincón L., Orellana F., (2007). *Evaluación de las propiedades mecánicas y la metalurgia de la soldadura de acero inoxidable austenítico AWS-304 mediante los procesos SMAW y GTAW*. Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo. Venezuela.

- Terán G., Tovar C., Portocarrero J., De Sánchez N. (2004). *Estudio de la corrosión producida en aceros inoxidables 304 en procesos de soldadura*. Universidad Católica de Valparaíso, Madrid- España. Disponible en la red en: <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2469582&info>

- Torres A., Pérez J., Ramírez A., Martínez M., (2006). *Estudio de la corrosión en barras de aceros inoxidables en concreto contaminado por cloruros cuando se le aplican esfuerzos residuales*. México.

- Uzcátegui I., (1973). *CORROSIÓN*, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad de Carabobo. Venezuela.

- Vázquez A., Sánchez A., Nóvoa X. *X Congreso Nacional de Materiales*. Universidad de Vigo, E.T.S.E.I., Campus Universitario Donostia - San Sebastián, 2008.

ANEXOS

