



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESTUDIO DE CORROSIÓN ACELERADA SOBRE UNA JUNTA SOLDADA DE ACERO DÚPLEX 2205 SOLDADO CON ELECTRODO ER-2594

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

ESCOLA SANDOVAL ÁLVARO PAÚL
alvaro.escola@epn.edu.ec

GAVILANES ANDRADE JHONATAN JAVIER
jhonatan.gavilanes@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. DÍAZ CAMPOVERDE CARLOS WIME, M.Sc.
carlos.diaz@epn.edu.ec

Quito, octubre 2018

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Álvaro Paúl Escola Sandoval y Jhonatan Javier Gavilanes Andrade, bajo mi supervisión.

Ing. Carlos Wime Díaz Campoverde M.Sc.

DIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Nosotros, Álvaro Paúl Escola Sandoval y Jhonatan Javier Gavilanes Andrade, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Álvaro Paúl Escola Sandoval

Jhonatan Javier Gavilanes Andrade

DEDICATORIA

El presente proyecto va dedicado a mis padres Olivia y Segundo, ya que su arduo esfuerzo y apoyo incondicional se ven plasmado en este trabajo, en mi éxito personal y profesional.

Además, va dedicado a mi hermana Natalia, quien es mi ejemplo a seguir y fue la persona quien me inculcó la forma correcta de planificar mi futuro académico.

ÁLVARO

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios y a la Virgen Dolorosa, por cuidarme cada día y darme la fuerza para cumplir mis objetivos trazados.

Agradezco a mis padres Olivia, Segundo que a pesar de la distancia siempre han apoyado mis decisiones académicas y personales, por inculcarme valores éticos para ser una persona correcta y honesta.

Agradezco a mi hermana Natalia por ser la persona que me supo guiar a escoger a la Escuela Politécnica Nacional como la universidad ideal para mis estudios y por cuidarme como una madre durante mi carrera universitaria.

Un agradecimiento muy especial para el Ing. Carlos Díaz M.Sc por el apoyo brindado en la realización de este proyecto, por sus enseñanzas, consejos y por su amistad incondicional, de igual manera a quienes forman parte del Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla de la EPN, con quienes compartí gratos momentos y adquirí muchos conocimientos científicos.

Agradecer a mis amigos Dennis, Cristian, Israel, Jerson y Juan, con quienes compartimos gratos momentos en las aulas y fuera de ellas, agradecerles por haber cuidado de mi persona en los momentos difíciles.

Agradecer a Xavier, Tebo y Andrés quienes me brindaron su apoyo para la culminación de este trabajo, a mas de adquirir cada día conocimientos y momentos gratos en nuestro segundo hogar EL LABORATORIO.

A los amigos de la vida que Dios pone en tu camino para hacer un día a día algo mejor; Tamara, Fátima, Dayana y Karina un agradecimiento especial por su amistad y hermandad en los momentos mas felices y más dolorosos.

ÁLVARO

DEDICATORIA

El presente trabajo quiero dedicar a mis padres, Luis y Katy que, son quienes han hecho que todo esto sea posible.

A Steven, mi hermano y mejor amigo, quien también es un soporte para mí, y lo ha sido durante este proceso.

A Juan Sebastián, mi hermoso hijo, quien es mi motivación, mi razón de seguir cada día adelante. Te amo hijo mío.

A mis abuelos, Jorge e Ibelia que, con sus consejos y sus palabras de apoyo han contribuido a la culminación de este proyecto, mil gracias por su apoyo incondicional, y aquí la prueba de que esos consejos y ese apoyo dieron frutos. Los amo mucho.

A mi tío, Francisco Gaona, una persona muy amable y cariñosa, que estuvo siempre dispuesta a ayudarnos.

A mis compañeros de aula, con quien he compartido gratos momentos estudiantiles, gracias porque sé que también aportaron con un granito de arena, ellos saben quiénes son, no los quiero nombrar de uno en uno por miedo a olvidarme de alguno. Gracias compas.

A Santiago Moposita, mi mejor amigo y compadre, gracias por todo Mopito. Por fin se logró el objetivo.

A Rake, gracias por estar ahí siempre que te he necesitado, por ser incondicional, por el apoyo brindado, por ese cariño y ese afecto tan especial hacia mí, eres muy importante en mi vida y sobre todo gracias por el ánimo para culminar con todo este proyecto y esta meta. Lo logramos Rake!

A mis amiguis de mi vida y de mi corazón: Jaz, Danny, Edith, Adri. (Espero no olvidarme de ninguna). Las quiero mucho hermosas

JHONATAN

AGRADECIMIENTO

Primero, quiero agradecer a Dios por la vida que me ha dado para poder estar donde hoy estoy, por darme las fuerzas necesarias para no decaer jamás y seguir siempre adelante esforzado y valiente como dice en Su Palabra.

Quiero agradecer a Luis, mi padre, quien supo siempre apoyarme en cada etapa de mi vida hasta estas instancias, siempre con una palabra de aliento para que siga adelante y no desmaye jamás hasta cumplir este objetivo tan anhelado.

A Katy, quien aparte de ser mi hermosa madre, es mi mejor amiga y de igual forma, siempre ha estado ahí brindándome su compañía, su apoyo y su amor incondicional, gracias a los dos por haberme educado con valores y principios y hacerme un hombre de bien, por haberme enseñado que con esfuerzo y constancia se logra alcanzar las metas que uno se propone.

A mi tío, Francisco Gaona, por abrirme las puertas de su casa en Guayaquil para poder realizar parte del trabajo experimental, le quedaré eternamente agradecido.

Quiero agradecer a mi director de tesis, Ingeniero Carlos Díaz por su apoyo constante dentro de toda la realización de este trabajo, por sus enseñanzas y porque muy aparte de ser nuestro maestro, es un excelente amigo y profesional.

A René Jame, personal del Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla, quién se ha convertido en un gran amigo, además de ayudarnos con la parte experimental de nuestro proyecto, muchas gracias por siempre abrirnos las puertas.

A la Ingeniera Patricia Proaño por también contribuir para que la realización de este proyecto se diera.

A la Escuela Politécnica Nacional en general, junto con su grupo de docentes que me formaron en el ámbito profesional, y que cada uno de sus enseñanzas impartidas se ven reflejadas en este trabajo.

JHONATAN

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN.....	i
DECLARACIÓN.....	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
ÍNDICE.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo general	1
Objetivos específicos.....	1
1. MARCO TEÓRICO.....	2
1.1. Aceros Dúplex	2
1.1.1. Microestructura de los aceros Dúplex	3
1.1.2. Acero Dúplex familia 2205	4
1.1.3. Soldabilidad de aceros Dúplex	6
1.2. Características del material aporte	9
1.3. Procesos de corrosión en aceros Dúplex	10
1.3.1. Corrosión generalizada	11
1.3.2. Corrosión intragranular.....	11
1.3.3. Corrosión por picaduras.....	12
1.3.4. Corrosión bajo esfuerzos	13
1.3.5. Corrosión marina.....	14
2. METODOLOGÍA.....	16

2.1. Proceso de soldadura GTAW	16
2.1.1. Preparación material base	16
2.1.2. Selección de material aporte.....	16
2.1.3. Parámetros de soldadura	17
2.1.4. Equipos para el proceso de soldadura	18
2.1.5. Procedimiento del proceso de soldadura	18
2.2. Caracterización mecánica	21
2.2.1. Ensayo de doblado guiado.....	21
2.2.1.1. Probetas para ensayo de doblado guiado.....	22
2.2.1.2. Equipo para ensayo de doblado guiado	23
2.2.1.3. Procedimiento de ensayo de doblado guiado	23
2.2.2. Ensayo de tracción.....	23
2.2.2.1. Probetas para ensayos de tracción	24
2.2.2.2. Equipo para ensayo de tracción	24
2.2.2.3. Procedimiento de ensayo de tracción.....	25
2.3. Ensayo de corrosión.....	25
2.3.1. Probetas para ensayo de corrosión	25
2.3.2. Corrosión bajo esfuerzos	26
2.3.3. Velocidad de corrosión.....	29
2.3.4. Equipo para ensayo de corrosión	29
2.3.5. Procedimiento para ensayo de corrosión Quito	31
2.3.6. Procedimiento para ensayo de corrosión Guayaquil.....	33
2.4. Análisis metalográfico	33
2.4.1. Metalografías.....	33
2.4.1.1. Probetas para análisis metalográfico.....	33
2.4.1.2. Equipo para análisis metalográfico	34
2.4.1.3. Procedimiento para análisis metalográfico	36
2.4.2. Micro-dureza.....	37

2.4.2.1. Probetas para ensayo de micro-dureza.....	37
2.4.2.2. Equipo para ensayo de micro-dureza.....	38
2.4.2.3. Procedimiento para ensayo de micro-dureza.....	38
2.4.3. Dureza.....	38
2.4.3.1. Probetas para ensayo de dureza.....	39
2.4.3.2. Equipo para ensayo de dureza.....	39
2.4.3.3. Procedimiento para ensayo de dureza.....	39
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	40
3.1. Resultados.....	40
3.1.1. Proceso de soldadura.....	40
3.1.2. Ensayo de doblado guiado.....	41
3.1.3. Ensayo de tracción.....	42
3.1.4. Metalografías metal base, zona afectada por el calor y cordón de soldadura ...	43
3.1.5. Ensayo de corrosión Quito.....	46
3.1.6. Ensayo de corrosión Guayaquil.....	48
3.1.7. Pérdida de masa y deformación durante el ensayo.....	50
3.1.8. Metalografías de los especímenes después del ensayo de corrosión.....	51
3.1.9. Velocidad de corrosión.....	53
3.1.10. Ensayo de micro-dureza.....	54
3.1.11. Ensayo de dureza.....	55
3.2. Discusión.....	57
3.2.1. Proceso de soldadura.....	57
3.2.2. Ensayo de doblado guiado.....	57
3.2.3. Ensayo de tracción.....	58
3.2.4. Metalografías metal base, zona afectada por el calor y cordón de soldadura ...	60
3.2.5. Ensayo de corrosión bajo esfuerzos.....	65
3.2.6. Análisis de corrosión.....	66
3.2.7. Análisis de la pérdida de masa.....	68

3.2.8. Ensayo de micro-dureza	70
3.2.9. Ensayo de dureza	71
3.2.10. Discusión general.....	72
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	74
4.1. Conclusiones	74
4.2. Recomendaciones.....	75
Referencias Bibliográficas.....	76
Anexos	79
ANEXO I. PROPIEDADES DEL ACERO DÚPLEX 2205 SEGÚN NORMA ASTM A182/A182M-18.....	79
ANEXO II. DOCUMENTOS DE SOLDADURA (WPS, WPQ, PQR).	82
ANEXO III. NÚMERO DE ESPECÍMENES PARA ENSAYO DE DOBLADO GUIADO Y ENSAYO DE TRACCIÓN SEGÚN LA NORMA ASME SECCION IX.....	86
ANEXO IV. INFORME TÉCNICO DEL ENSAYO DE TRACCIÓN.....	88
ANEXO V. RESULTADOS DEL ENSAYO DE CORROSIÓN DE LOS ESPECÍMENES EN QUITO Y GUAYAQUIL.....	92
ANEXO VI. RESULTADOS DE PÉRDIDA DE MASA DE LOS ESPECÍMENES EN QUITO Y GUAYAQUIL.	98
ANEXO VII. METALOGRAFÍAS DE LOS ESCPECÍMENES DESPUÉS DEL ENSAYO DE CORROSIÓN.	100
ANEXO VIII. HOJA DE VIDA DEL MATERIAL BASE.....	103
ANEXO IX. DETALLE DE CÁLCULO DE CROMO Y NÍQUEL EQUIVALENTES.....	106
ANEXO X. DETALLE DE CÁLCULO DEL ESFUERZO APLICADO CON RESPECTO AL LÍMITE ELÁSTICO.....	108
ANEXO XI. DETALLE DE CÁLCULO DEL ÍNDICE DE PICADURAS (PREN) DEL ACERO DÚPLEX 2205	110

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Microestructura de aceros inoxidable ferríticos, dúplex laminados y austeníticos.....	3
Figura 1.2. Microestructura de acero dúplex laminado.	4
Figura 1.3. Diagrama de fases ternario Fe-Cr-Ni con 70% de hierro.....	5
Figura 1.4. Esquema del sistema de soldadura GTAW (TIG).....	7
Figura 1.5. Esquema de tipos polaridad de corriente continua.....	8
Figura 1.6. Corrosión generalizada.....	11
Figura 1.7. Corrosión Intergranular en aceros Dúplex.	12
Figura 1.8. Rotura de la capa protectora debido a la corrosión.	13
Figura 1.9. Propagación de grieta en la corrosión bajo tensión.....	14
Figura 1.10. Corrosión marina en aceros Dúplex.....	15
Figura 2.1. Varilla de aporte ER-2594 LINCOLN ELECTRIC.....	17
Figura 2.2. a) Corte del tubo en una cortadora de agua, b) Tubo cortado en forma de anillos.....	18
Figura 2.3. Diseño de la junta de soldadura.	19
Figura 2.4. Preparación de la junta.....	19
Figura 2.5. Sellado y compactado del material base.....	19
Figura 2.6. Material base en la posición 6G.	20
Figura 2.7. Pase de raíz.....	20
Figura 2.8. Soldadura de pases de relleno.....	20
Figura 2.9. Limpieza de la soldadura con grata.....	21
Figura 2.10. Esquema del ensayo de doblado guiado.	22
Figura 2.11. Dimensión de Probetas para ensayos de doblado guiado.....	22
Figura 2.12. Dimensiones de probeta para ensayo de tracción.....	24
Figura 2.13. Dimensiones de probeta para ensayo de corrosión.....	26
Figura 2.14. Diagrama de distribución de cargas en los especímenes.....	27
Figura 2.15. Dimensiones del porta-probetas.....	28
Figura 2.16. Ubicación de los especímenes en el porta-probetas.....	28
Figura 2.17. Medio de corrosión acelerada, a) ubicación de los focos incandescentes, b) cámara en funcionamiento, c) sellado de cámara para evitar pérdidas de calor, d) arduino controlador de temperatura.....	30
Figura 2.18. a) Probeta del material base, b) Probeta de la soldadura.....	34
Figura 2.19. Reactivos químicos, a) Marble, b) Agua regia.....	35
Figura 3.1. Fractura de la probeta T-1 (cara frontal).....	42

Figura 3.2. Fractura de la probeta T-1 (cara posterior).	42
Figura 3.3. Fractura de la probeta T-2 (cara frontal).	43
Figura 3.4. Fractura de la probeta T-2 (cara posterior).	43
Figura 3.5. Metalografía de la distribución de las zonas: metal base, zona afectada por el calor y cordón de soldadura.	44
Figura 3.6. Fases microestructurales presentes en la zona afectada por el calor con aumento 500X.	44
Figura 3.7. Ángulos y altura de deformación de los especímenes aplicado el torque: a) 2,71 Nm, b) 5,42 Nm, c) 8,13 Nm.	51
Figura 3.8. Barrido de micro-durezas: a) probeta testigo, b) probeta UIO 1_1, c) probeta GYE 2_1.	54
Figura 3.9. Barrido de durezas: a) probeta testigo, b) probeta UIO 1_1, c) probeta GYE 2_1.	55
Figura 3.10. Dureza vs Distancia para la probeta testigo.	56
Figura 3.11. Dureza vs Distancia para la probeta UIO 1_1.	56
Figura 3.12. Dureza vs Distancia para la probeta GYE 2_1.	56
Figura 3.13. Distribución de las fases ferrita y austenita en el acero Dúplex 2205: a) acero en bruto, b) acero laminado.	60
Figura 3.14. Metalografías del acero Dúplex 2205 laminado: a) y c) Presente trabajo; b) Bruno & Martins das Neves; d) Amaury.	61
Figura 3.15. Fases secundarias presentes en la zona afectada por el calor.	61
Figura 3.16. Micrografías de los aceros tratados térmicamente a 850 °C durante 35 minutos: a) UNS S32750, b) UNS S32760.	62
Figura 3.17. Metalografías de la soldadura de un acero Dúplex 2205, forma de la ferrita; a) aumento 500X, b) aumento 100X.	64
Figura 3.18. Diagrama de Schaeffler/Delong aplicado al material base y al material de aporte ER-2594.	65
Figura 3.19. Variación de masa vs tiempo para UIO 1_1.	68
Figura 3.20. Variación de masa vs tiempo para GYE 2_1.	69
Figura 3.21. Velocidad de corrosión vs tiempo, para los especímenes UIO 1_1 y GYE 2_1.	69
Figura 3.22. Pérdida de material: a) UIO 1_1, b) GYE 2_1.	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Elementos aleantes presentes en los aceros Inoxidables.	2
Tabla 1.2. Composición química acero Dúplex 2205 según ASTM A182/A182M-18.	5
Tabla 1.3. Rangos de temperatura para tratamiento térmico de temple en aceros Dúplex 2205.	6
Tabla 1.4. Propiedades mecánicas del acero Dúplex 2205.	6
Tabla 1.5. Composición química varilla de aporte ER-2594.	10
Tabla 1.6. Propiedades mecánicas varilla de aporte ER-2594.	10
Tabla 1.7. Parámetros de soldadura recomendados.	10
Tabla 2.1. Comparación de propiedades de material base y material aporte.	17
Tabla 2.2. Especificaciones técnicas de la máquina de soldadura GTAW.	18
Tabla 2.3. Especificaciones técnicas de la máquina de doblado guiado.	23
Tabla 2.4. Especificaciones técnicas de la máquina universal de ensayos.	24
Tabla 2.5. Compuestos químicos de la composición salina.	26
Tabla 2.6. Torques asignados para cada espécimen.	27
Tabla 2.7. Especificaciones técnicas del torquímetro digital.	30
Tabla 2.8. Especificaciones técnicas de la balanza digital.	31
Tabla 2.9. Procedimiento de evaluación de corrosión cada 15 días.	32
Tabla 2.10. Especificaciones técnicas de la máquina desbastadora de disco.	34
Tabla 2.11. Especificaciones técnicas de la lijadora a mano y lijas.	35
Tabla 2.12. Especificaciones técnicas de la máquina de pulido de paño.	35
Tabla 2.13. Especificaciones técnicas del microscopio metalográfico (micrografías).	36
Tabla 2.14. Especificaciones técnicas del microscopio metalográfico (macrografías).	36
Tabla 2.15. Especificaciones técnicas del equipo de ensayo de micro-dureza.	38
Tabla 2.16. Especificaciones técnicas del equipo de ensayo de dureza.	39
Tabla 3.1. Parámetros de soldadura.	40
Tabla 3.2. Especímenes sometidos al ensayo de doblado guiado.	41
Tabla 3.3. Resultados de los ensayos de tracción.	42
Tabla 3.4. Metalografías del metal base.	43
Tabla 3.5. Metalografías del cordón de soldadura en la raíz, centro y cara de la soldadura.	45
Tabla 3.6. Resultados del ensayo de corrosión Quito.	47
Tabla 3.7. Resultados ensayo de corrosión Guayaquil.	49
Tabla 3.8. Resultados de pérdida de masa de los especímenes expuestos a corrosión. ..	50
Tabla 3.9. Metalografías del espécimen UIO 1_1.	51

Tabla 3.10. Metalografías del espécimen GYE 1_1.....	53
Tabla 3.11. Velocidad de corrosión de los especímenes UIO 1_1 Y GYE 2_1 a 720 horas.	53
Tabla 3.12. Velocidad de corrosión de los especímenes UIO 1_1 Y GYE 2_1 a 1440 horas.....	54
Tabla 3.13. Velocidad de corrosión de los especímenes UIO 1_1 Y GYE 2_1 a 2160 horas.....	54
Tabla 3.14. Valores de micro-dureza probeta testigo.....	54
Tabla 3.15. Valores de micro-dureza probeta UIO 1_1.....	55
Tabla 3.16. Valores de micro-dureza probeta GYE 2_1.....	55
Tabla 3.17. Resultados del proceso de soldadura con el material de aporte ER-2594. ...	57
Tabla 3.18. Especímenes sometidos al ensayo de doblado guiado.....	58
Tabla 3.19. Valores de resistencia a la tracción.....	58
Tabla 3.20. Metalografías del cordón de soldadura: raíz, centro y cara en aumento de 100X.....	63
Tabla 3.21. Valores promedio de micro-dureza para probeta testigo, UIO 1_1, GYE 2_1.	71
Tabla 3.22. Valores promedio de dureza para probeta testigo, UIO 1_1 y GYE 2_1.....	72

RESUMEN

En el trabajo presentado a continuación se detalla el estudio del proceso de corrosión acelerada en una junta soldada de acero inoxidable Dúplex 2205, dentro del cual se realizan análisis en la zona afectada por el calor y material de aporte. Con esto, se pretende alcanzar un estudio minucioso de cómo se comporta el material frente a la corrosión cuando está bajo esfuerzos.

El material de aporte a ser utilizado es el ER-2594, debido a que los componentes, características y propiedades, son compatibles con las del material base, lo que posibilita realizar este ensayo de corrosión.

El fin de la realización de este trabajo es, comparar con trabajos o proyectos ya desarrollados con anterioridad. Los resultados obtenidos determinan la factibilidad de este proyecto de investigación. Concluyendo así, si el trabajo resultó de manera satisfactoria en comparación con los trabajos expuestos acerca del mismo tema.

El ensayo de corrosión establecido para este trabajo es por inmersión, con los especímenes bajo esfuerzos y en solución salina a condiciones de trabajo costera. El material base trabaja en estas condiciones, para lo cual, se realiza el trabajo en la ciudad de Quito y la ciudad de Guayaquil. En la ciudad de Quito se simula un medio cáustico que nos ayudará a simular las condiciones de trabajo costeras.

Se obtiene que no hay la presencia de corrosión bajo esfuerzos, que es el objetivo de este estudio.

Palabras clave: cáustico, corrosión, Dúplex, ER-2594, Guayaquil, inmersión, Quito.

ABSTRACT

In this work, it shows the study of corrosion process quickly in a welded joint of stainless steel Duplex 2205. Inside this project will be done an analysis about of ZAC and rod fill of electrode. Furthermore, it pretends to do an exhaustive study about of material's behavior with corrosion process by cracking.

The material that use in this project is ER-2594, because it has a variety of compounds, characteristics and properties that has compatibility of base material.

The purpose of the realization of this study is: compare this work with others that talk about the same topic, and projects already developed before of. The measurements obtained after this work determine the feasibility of this research project. Thus, if the work was satisfactory in comparison with the works exposed on the same way. The corrosion test by immersion in saline solution and under stress cracking is the method that it establishes this work, because the base material have been working at coastal conditional environments. Furthermore, work is done in the Quito's city and Guayaquil's city because about of. In Quito, a caustic environment is simulated which help us to simulate the coastal conditions. There is no corrosion under stress cracking, which is the objective of this study.

Keywords: caustic, corrosion, Dúplex, ER-2594, Guayaquil, immersion, Quito

ESTUDIO DE CORROSIÓN ACELERADA SOBRE UNA JUNTA SOLDADA DE ACERO DÚPLEX 2205 SOLDADO CON ELECTRODO ER-2594

INTRODUCCIÓN

La excelente combinación entre las propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión de los aceros inoxidable Dúplex 2205, hacen que se genere interés por el estudio de estos materiales y su soldabilidad.

La corrosión acelerada se presenta debido a las condiciones de trabajo a las cuales se encuentra sometida, las mismas que son ambientes salinos. Uno de los principales problemas de falla presentados son las discontinuidades ubicadas a lo largo de la tubería, dentro de la soldadura y de la zona afectada por el calor (ZAC).

El estudio se lo realiza con el fin de encontrar una posible solución al problema de corrosión presentado. Estableciendo como alternativa el uso del electrodo ER-2594 que es más compatible con el acero inoxidable Dúplex 2205, para determinar la factibilidad de su aplicación.

Sometiendo a este material a un ensayo de corrosión acelerada bajo esfuerzos, se puede obtener el comportamiento presentado frente a este tipo de ambientes, observando así, como es su resistencia a la corrosión.

Objetivo general

Estudiar el proceso de corrosión acelerada sobre una junta soldada de acero Dúplex 2205 soldado con electrodo ER-2594

Objetivos específicos

- Realizar la caracterización de las zonas corroídas en la soldadura
- Analizar el comportamiento de la corrosión dentro de la soldadura con el electrodo ER-2594
- Efectuar el ensayo de corrosión en el cordón de soldadura y zona afectada por el calor.
- Realizar el análisis y discusión de resultados

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Aceros Dúplex

Los aceros Dúplex son aleaciones bifásicas basadas en el sistema Fe-Cr-Ni, denominados “dúplex” por el latín “doble”. Poseen una combinación de propiedades de aceros austeníticos y ferríticos, por tal motivo su microestructura presenta aproximadamente iguales proporciones de ferrita y austenita con porcentajes de carbono menores al 0,03%. Los elementos aleantes cromo y molibdeno; mejoran y aumentan la resistencia a la corrosión por picadura y por fisuras; níquel y nitrógeno permiten un balance adecuado entre las fases ferríticas y austeníticas. En la Tabla 1.1 se muestran algunos elementos aleantes comunes en estos aceros y las propiedades que brindan.

Tabla 1.1. Elementos aleantes presentes en los aceros Inoxidables.

Elemento	Símbolo	Influencia que brinda al acero inoxidable
Cromo	Cr	Resistencia a la corrosión
Níquel	Ni	Ductilidad, dureza, soldabilidad
Molibdeno	Mo	Resistencia a la corrosión
Nitrógeno	N	Resistencia a la tracción y corrosión
Titanio	Ti	Resistencia a la corrosión cerca a la soldadura
Azufre	S	Maquinabilidad
Carbono	C	Bajo contenido de carbono brinda una mejor resistencia a la corrosión cerca a la soldadura
Manganeso	Mn	Una alternativa del Níquel para ductilidad, dureza y soldabilidad
Silicio	Si	Resistencia a la oxidación a altas temperaturas
Hierro	Fe	-

(Fuente: Backhouse, 2011)

Estos aceros poseen características como:

- Mayor resistencia mecánica.
- Alta resistencia a la tracción y punto de fluencia.
- Resistencia a la erosión y abrasión.
- Resistencia a la corrosión por picaduras, fatiga e intragranular.
- Son magnéticos.
- Buena soldabilidad y maleabilidad.

Estas aleaciones bifásicas se desarrollaron con la finalidad de proporcionar al campo industrial un material con excelentes características, considerando que la estructura de los

aceros dúplex combina las cualidades favorables de los aceros austeníticos y ferríticos para obtener mejores propiedades.

Los aceros inoxidable austeníticos son de buena soldabilidad, pero muestran problemas de corrosión por agrietamiento. Los aceros ferríticos son frágiles, de mala soldabilidad, pero resistentes a la corrosión por agrietamiento. Se puede obtener un material con excelente resistencia a la corrosión localizada en soluciones que contienen cloruro neutro y ácido debido al incremento de elementos aleantes como el cromo, molibdeno y nitrógeno.

1.1.1. Microestructura de los aceros Dúplex

Estos aceros poseen una microestructura combinada de ferrita y de austenita en equidad de proporciones. La ferrita proporciona una alta resistencia a la tensión, así como resistencia a la corrosión bajo tensión (SCC) y la austenita brinda buena ductilidad y de igual forma resistencia a la corrosión generalizada.

Para conseguir una determinada fracción de volumen de cada fase microestructural, se realiza un control del contenido de cromo, níquel y molibdeno, que brindan diferentes propiedades siendo la resistencia a la corrosión una de las principales ventajas.

En la Figura 1.1 se muestran las microestructuras que presentan los aceros inoxidables ferríticos, dúplex laminados y austeníticos.

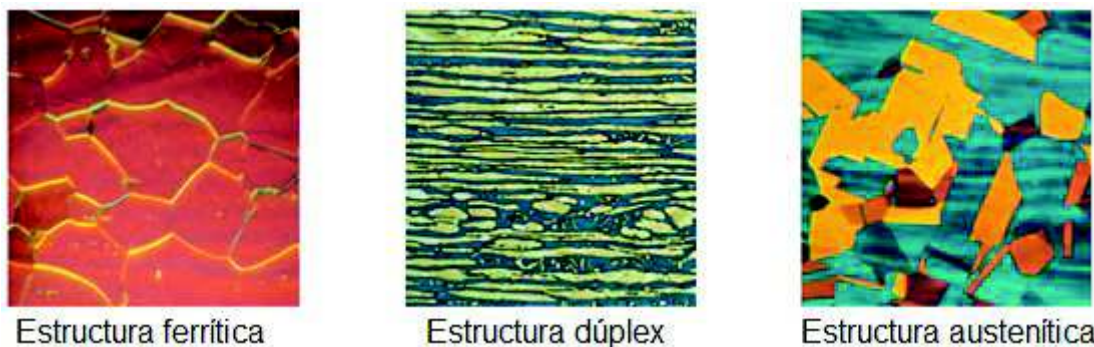


Figura 1.1. Microestructura de aceros inoxidables ferríticos, dúplex laminados y austeníticos.

(Fuente: Association, 2012)

La presencia de cromo y molibdeno permiten una estabilización de la austenita. El níquel en menores porcentajes permite aumentar la cantidad de ferrita, con la adición de nitrógeno se alcanza una regeneración de las fases austenita-ferrita y minimiza las segregaciones de

cromo y molibdeno sin la necesidad de aplicar algún tratamiento térmico después de la soldadura. (Lázaro, 2012)

Para el proceso de fabricación de estos aceros, se comienza con el proceso de fundición de todos los elementos aleantes que lo componen. La fase ferrítica es la primera en formarse durante la solidificación consolidándose como la matriz, la austenita se forma posteriormente al enfriamiento distribuyéndose en la matriz ferrítica. En la Figura 1.2 se muestra la microestructura de un acero dúplex laminado.

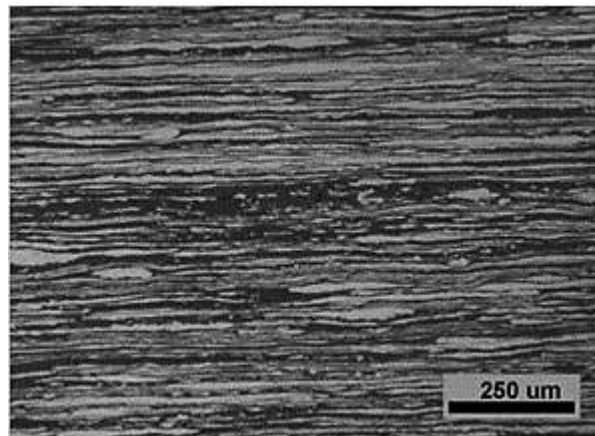


Figura 1.2. Microestructura de acero dúplex laminado.

(Fuente: Westin, 2010)

1.1.2. Acero Dúplex familia 2205

En el campo industrial existe una gran cantidad de aceros inoxidable comerciales que van desde los grados Dúplex de menor aleación hasta los de alta aleación como los Superdúplex. La numeración 2205 es una serie de esta familia de aceros en la cual se mejora su proceso de fabricación con la adición de nitrógeno, retardando significativamente la formación de fases sigma y chi que se generan en aceros inoxidable con alto contenido de cromo y molibdeno. Por lo tanto, es esencial que esté presente suficiente nitrógeno en solución sólida. Esto, con la finalidad de superar problemas de corrosión presentadas en otras series y estabilizar la fase austenítica de su microestructura, aumentando así la resistencia a la corrosión general, localizada y bajo esfuerzos en cualquier medio corrosivo.

Las buenas propiedades mecánicas y la resistencia a la corrosión dependen del equilibrio adecuado de ferrita y austenita. Sin embargo, en los procesos de soldadura se debe controlar el correcto balance de dichas fases y, evitar la formación de precipitados o fases

secundarias las cuales son perjudiciales afectando negativamente a las propiedades características de esta familia de aceros inoxidable. (Vasconellos, 2008).

En la Tabla 1.2 se muestran los elementos aleantes cromo, molibdeno, níquel y nitrógeno que brindan a esta familia de aceros la característica principal de ser resistente a la corrosión.

Tabla 1.2. Composición química acero Dúplex 2205 según ASTM A182/A182M-18.

Serie	Elementos Aleantes								
	% C	% Mn	% P	% S	% Si	% Ni	% Cr	% Mo	% N
31803	0,030	2,00	0,030	0,03	1,00	4,5 – 6,5	21,0 – 23,0	2,5 – 3,5	0,08 - 0,20

(Fuente: ASTM A182/A182M-18, 2017)

Esta serie de aceros presentan buenas propiedades mecánicas en relación con los ferríticos y austeníticos, a estos aceros se les puede aplicar tratamientos térmicos como: recocido, normalizado y temple, con el fin de obtener la equidad de sus fases microestructurales (ferrita y austenita). En el diagrama Fe-Cr-Ni (Figura 1.3), se presentan los valores de temperatura, donde la microestructura del material cambia. La Norma ASTM A182/A182M-18 (ANEXO I) proporciona los rangos de temperatura adecuados para la aplicación del tratamiento térmico de temple (Tabla 1.3).

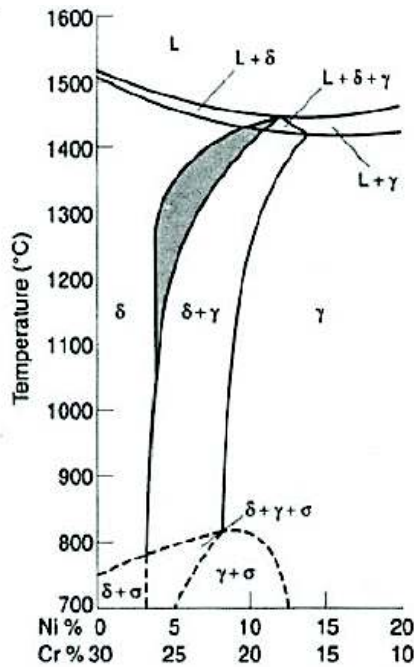


Figura 1.3. Diagrama de fases ternario Fe-Cr-Ni con 70% de hierro.

(Fuente: Gunn, 1997)

Tabla 1.3. Rangos de temperatura para tratamiento térmico de temple en aceros Dúplex 2205.

Grado	Designación UNS	Tipo de tratamiento térmico	Temperatura mínima °C [°F]	Medio de enfriamiento	Temperatura de enfriamiento °C [°F]
F 51	S31803	Templado	1020 [1870]	Líquido	260 [500]
F 60	S32205	Templado	1020 [1870]	Líquido	260 [500]

(Fuente: ASTM A790, 2018)

Tabla 1.4. Propiedades mecánicas del acero Dúplex 2205.

Grado	Designación UNS	Resistencia a la tracción mín, MPa [Ksi]	Límite elástico min, MPa [Ksi]	Elongación en 2". [50mm] o 4D, mín, %	Dureza máx HRC
F 51	S31803	620 [90]	450 [65]	25	30
F 60	S32205	655 [95]	450 [65]	25	30

(Fuente: ASTM A182/A182M-18, 2017; ASTM A790, 2018)

Estos aceros son usados para diferentes aplicaciones como tuberías, tubos de intercambiadores de calor y en la industria química.

1.1.3. Soldabilidad de aceros Dúplex

Gracias al alto contenido de ferrita, estos aceros presentan una gran soldabilidad y alta resistencia al agrietamiento en caliente. Sin embargo, la soldadura debe ser realizada con cuidados específicos que permitan conservar sus propiedades mecánicas y corrosivas. Los problemas se presentan en la zona afectada por el calor debido a que las fases microestructurales de ferrita y austenita, no se encuentran distribuidas correctamente, provocando una reducción en algunas de sus propiedades como: resistencia a la corrosión, agrietamiento y tenacidad. Una correcta limpieza de junta, el uso de gas de protección para la purga del pase de raíz, la prevención de la contaminación del arco de soldadura son factores de suma importancia para la soldabilidad de estos aceros. El procedimiento en su totalidad debe tener como objetivo mantener un balance en la microestructura de la junta soldada y, libre de precipitados.

Los aceros inoxidables Dúplex pueden ser unidos por diferentes procesos de soldadura: SMAW, GTAW (TIG/MIG), GMAW, FCAW, esto dependerá de factores importantes como alcanzar ciertos criterios respecto a las propiedades deseadas, costos y logística que brinden cada uno de los procesos.

El proceso más idóneo para la soldadura de tuberías es el GTAW, debido a la facilidad para el depósito del material de aporte, que con un control de alimentación del gas de protección permite obtener un pase de raíz de buena calidad. (Vasconellos, 2008)

El proceso de soldadura GTAW, permite la fusión de los metales mediante la generación de un arco eléctrico entre el electrodo no consumible de tungsteno y el metal base, se lo puede utilizar para soldar cualquier tipo de material ya sea chapas o tuberías en cualquier posición; tanto manual como automáticamente obteniendo una soldadura limpia con bajos niveles de inclusiones de escoria debido a que el área de soldadura se encuentra protegida con gas inerte (Argón, Helio) que no reacciona durante el proceso y permite evitar la contaminación de la zona. El gas se seleccionará dependiendo de las características del metal base que se va a soldar, en el caso particular del acero inoxidable Dúplex 2205 normalmente se utiliza 100% Argón.

En la Figura 1.4 se muestra el equipo requerido para este proceso de soldadura que consta de un suministro de energía, una torcha o soplete y el sistema de protección con el gas inerte.

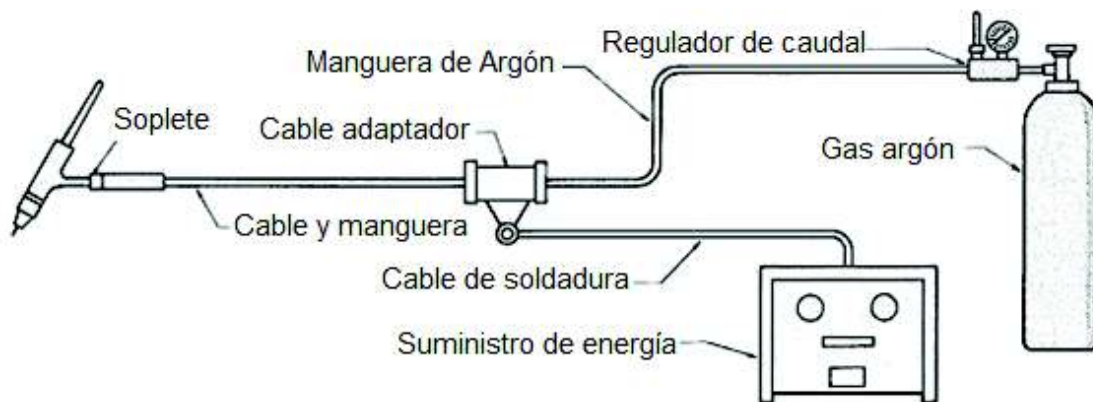


Figura 1.4. Esquema del sistema de soldadura GTAW (TIG).

(Fuente: Jeffus, 2008)

El proceso GTAW permite utilizar 3 tipos de corriente para la soldadura de esta serie de acero Dúplex, que serán escogidas en función de la aplicación industrial del material base y de las características que brinde el fabricante sobre la varilla de aporte a utilizarse. Estos tipos de corriente son corriente continua electrodo positivo, corriente continua electrodo negativo, corriente alterna. (Rodríguez, 2001). En la Figura 1.5 se muestra la distribución de estos tipos de polaridad.

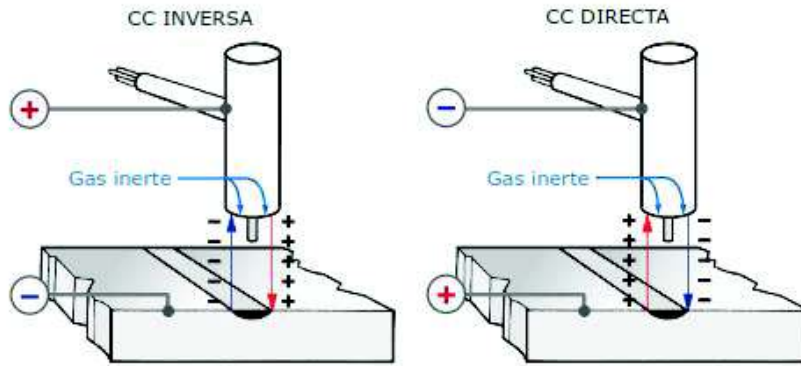


Figura 1.5. Esquema de tipos polaridad de corriente continua.

(Fuente: Rodríguez, 2001)

La corriente continua de electrodo positivo (polaridad inversa) centraliza en el terminal positivo (varilla de aporte) el 70% del calor y en el terminal negativo el 30% (metal base) aproximadamente. Esto contribuye a la selección de una varilla de aporte de mayor diámetro ya que el aporte de calor es alto, generando soldaduras más anchas y menos profundas.

En la corriente continua de electrodo negativo (polaridad directa) el efecto es contrario, en el metal base se concentra el 70% de calor y en la varilla de aporte el 30% restante, con un menor aporte de calor permite la selección de una varilla de aporte de menor diámetro. (Jeffus, 2008)

Un aspecto importante de la soldabilidad de estos aceros es estudiar el comportamiento que presentan durante el proceso de solidificación y la forma de enfriamiento, así como las fases microestructurales que se pueden generar.

Durante el enfriamiento, el acero inoxidable se solidifica como aleación monofásica ferrítica- δ sin llegar a transformarse en fase austenítica. En la zona afectada por el calor se produce un cambio de fase de ferrita- δ a austenita en conjunto con un afinamiento de grano, todo esto con el fin de mantener una igualdad de las fases austeníticas y ferríticas. Para obtener propiedades mecánicas óptimas y evitar fallos es necesario que la ferrita- δ no exceda el 60%.

Los parámetros de soldadura que no sean correctamente aplicados pueden afectar a la microestructura, una velocidad de avance elevada puede conllevar a que la austenita no tenga el tiempo necesario para su transformación, un aporte de calor incorrecto o bajo puede provocar que se formen granos de ferrita en la zona afectada por el calor. Cuando

las fases mencionadas no cumplen los porcentajes adecuados o los tiempos necesarios para sus transformaciones debido a problemas durante la soldadura, se ven reflejados en propiedades desfavorables como reducción de resistencia mecánica, resistencia corrosiva y tenacidad. (Lázaro, 2012)

Para evitar cambio de fases, cristalización del material aportado durante el proceso, empobrecimiento de la zona de soldadura debido al contacto con el medio ambiente y la atmósfera, se recomienda realizar una purga de oxígeno del lado posterior a la zona que se va a soldar. Además, velocidades de avance elevados y enfriamientos lentos permiten que las transformaciones de ferrita y austenita en el cordón de soldadura y en la zona afectada por el calor sean las adecuadas y así evitar fallos o roturas en el mismo, así como una buena difusión de los elementos aleantes.

1.2. Características del material aporte

El electrodo ER-2594 clasificado según la norma AWS A5.9/ASME SFA-5.9, posee una calidad superdúplex que proporciona características químicas y propiedades mecánicas coincidentes para aleaciones superdúplex forjadas como el caso del 2507 y Zeron 100, así como aleaciones de colada superdúplex (ASTM A890). Tiene buena resistencia a la corrosión por picaduras y bajo tensión. Se emplea en la industria offshore, papelera y refinación de combustibles.

Posee una aleación de 2 a 3 % de níquel, con el fin de generar una óptima relación en cuanto a la ferrita-austenita dentro de la soldadura terminada; dando como resultados: alta resistencia a la tracción, al límite de elasticidad, resistencia a la corrosión por esfuerzo, agrietamiento (SCC) y corrosión por picadura. (Lázaro, 2012)

Como principales aplicaciones tenemos:

- Industria aeronáutica
- Fabricación de tuberías
- Soldadura de bombas y válvulas
- Soldadura de recipientes a presión (Lázaro, 2012)

En la Tabla 1.5, Tabla 1.6 y Tabla 1.7 se muestra la composición química de la varilla de aporte, las propiedades mecánicas y los parámetros de soldadura, respectivamente. Estos datos son proporcionados por el fabricante y algunas fichas técnicas industriales.

Tabla 1.5. Composición química varilla de aporte ER-2594.

	%C	%Cr	%Ni	%Mo	%Mn	%Si
Requerimiento AWS ER2594	0,03 máx	24,0 - 27,0	8,0 - 10,5	2,5 - 4,5	2,5 máx	1,0 máx
Resultados típicos	0,02	24,6	8,6	3,8	0,8	0,3
	%P	%S	%N	%Cu	%W	Número de ferrita
Requerimiento AWS ER2594	0,03 máx	0,02 máx	0,20 - 0,30	1,5 máx	1,0 máx	No requerido
Resultados típicos	0,02	0,01	0,25	0,01	0,01	30 - 60

(Fuente: LINCOLN ELECTRIC, 2013)

Tabla 1.6. Propiedades mecánicas varilla de aporte ER-2594.

Tratamiento térmico	Resistencia a la tracción MPa (psi)	Límite de Fluencia MPa (psi)	Elongación en 2" [%]	Energía absorbida ISO-V (20°C) [J]
Sin tratamiento	870 (126 150)	695 (100 775)	30	> 32 J

(Fuente: SOLDEXA, 2017)

Tabla 1.7. Parámetros de soldadura recomendados.

Polaridad	Diámetro del material de aporte [in]	Intensidad de corriente [Amperios]	Voltaje [Voltios]	Flujo de gas [litros/min]	Distancia libre del electrodo Stick out [mm]
DC ⁻	3/32 "	60 - 145	8 - 15	8 - 20	-

(Fuente: SOLDEXA, 2017)

1.3. Procesos de corrosión en aceros Dúplex

Los aceros inoxidable poseen una gran resistencia a los problemas de corrosión debido a la presencia de los elementos aleantes en su composición, siendo el cromo el de mayor importancia al estar en un porcentaje del 12%. Este método de protección consiste en la formación de una capa de óxido continua, adherente y homogénea que resguarda al metal base del medio ambiente o de trabajo. Este mecanismo es aplicable a altas temperaturas de trabajo, cuando se trata de bajas temperaturas se forma una capa pasiva que es un film de óxido hidratado que cumple la misma función de protección. El nivel de protección dependerá del porcentaje de cromo, del espesor de esta capa y su distribución por la

superficie del metal base, así como de la familia del acero, su composición y del medio corrosivo al cual está expuesto.

Sin embargo, se generan problemas cuando el medio corrosivo al cual está sometido el material es demasiado agresivo, por ejemplo, cuando existe la presencia de ácidos reductores (clorhídrico o fluorhídrico), o por las sales (cloruros, fluoruros, bromuros y yoduros). (Ibarra & Nuñez, 2010). Los problemas de corrosión presentes en estos aceros son:

1.3.1. Corrosión generalizada

Se presenta cuando el material está en contacto con un medio corrosivo, como: ácido clorhídrico o soluciones industriales que poseen propiedades que debilitan a la capa de óxido de la superficie del material y disminuyan su pasividad originando una reducción del espesor del acero debido a la pérdida de material. También se puede originar debido a ligeros cambios en las condiciones de trabajo, como aire o las impurezas oxidantes, de igual manera con cambios metalúrgicos como segregaciones, precipitación de carburos o de fases intermetálicas. En la Figura 1.6 se muestra un ejemplo de corrosión generalizada en aceros inoxidable.



Figura 1.6. Corrosión generalizada.

(Fuente: GEMA, 2016)

Si se desea trabajar con soluciones de propiedades fuertemente reductoras, es recomendable usar otro tipo de acero inoxidable con alto contenido de níquel. (Alvarez & Degallaix, 2009).

1.3.2. Corrosión intragranular

Este tipo de corrosión afecta los bordes o límites de grano donde se puede mostrar niveles altos de corrosión localizada, debido a la disminución del contenido de cromo en la película pasiva protectora. En estas zonas se puede iniciar y propagar la nucleación de precipitados

metálicos (carburos, nitruros) o fases intermetálicas (σ , γ). Además, pueden concentrarse elementos como fósforo, silicio y boro, iniciando la corrosión en las zonas con mayor concentración. En la Figura 1.7 se muestra la forma de este proceso corrosivo.

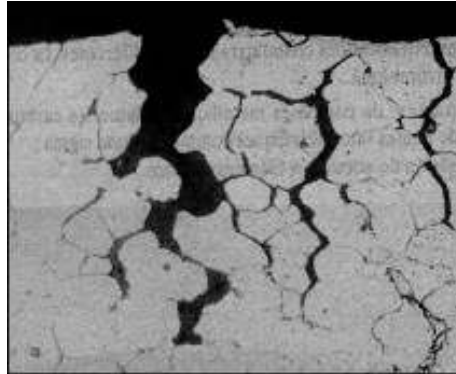


Figura 1.7. Corrosión Intergranular en aceros Dúplex.

(Fuente: Alvarez & Degallaix, 2009)

Estos precipitados se pueden formar debido a tratamientos térmicos mal aplicados en los procesos de fabricación del acero o en la soldadura de estos, en el caso de la soldadura afectando a la zona afectada por el calor del cordón debido a las altas temperaturas que se utilizan durante el proceso, produciendo carburos de cromo en los límites de la austenita siendo esta fase más sensible a la corrosión intergranular que la ferrita.

Para evitar este tipo de corrosión se usan aceros inoxidable de bajo contenido de carbono cuando los ambientes son demasiado agresivos, o aceros Inoxidables estabilizados cuando las temperaturas de trabajo son severas.

1.3.3. Corrosión por picaduras

Se produce cuando existe la presencia de una disolución anódica significativa en ciertas zonas de la superficie del acero causando una descomposición local de la capa pasiva de protección, cuando las condiciones corrosivas exceden los límites del dominio pasivo.

Esta degradación produce perforaciones en el acero y pérdida de material en las zonas afectadas. Se propaga de manera más rápida por lo que es más perjudicial que la corrosión uniforme, efectuándose mediante dos etapas, iniciación y propagación, las heterogeneidades mecánicas o geométricas no influyen en la etapa de iniciación, ya que en esta etapa se atacan las áreas más débiles de la película de protección iniciando la formación de inclusiones de gran tamaño. En la etapa de propagación ya se presentan

agujeros pequeños que son difíciles de detectar visualmente, y se propagan de manera local. En la Figura 1.8 se muestra la rotura de la capa protectora debido a la corrosión.

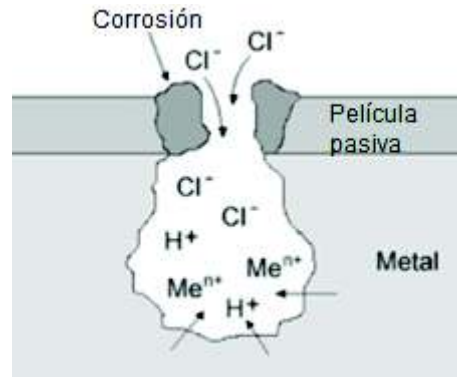


Figura 1.8. Rotura de la capa protectora debido a la corrosión.

(Fuente: Westin, 2010)

La velocidad de propagación dependerá de la concentración de electrolitos en el medio corrosivo, potencial eléctrico, esfuerzos en superficies débiles o con imperfecciones. Estos producen que la capa de pasivación este en constante ruptura y regeneración; y en condiciones elevadas de concentración de electrolitos y potencial eléctrico, esta capa de protección no se regenera. (Alvarado & Flores, 2006)

Al aumentarle nitrógeno a la composición química de estos aceros, ayuda a una estabilización de las fases metalúrgicas a altas temperaturas, siendo que, si se tiene un porcentaje menor de ferrita, mantiene su resistencia corrosiva por picaduras, aumentando en la fase austenítica los porcentajes de cromo y molibdeno.

Para reducir los efectos de este tipo de corrosión se suele disminuir la agresividad del medio corrosivo y utilizar aceros que contengan un mayor contenido de molibdeno.

1.3.4. Corrosión bajo esfuerzos

El agrietamiento por corrosión debido a las cargas mecánicas estáticas corresponde a uno de los mecanismos de falla frágil más comunes en los aceros inoxidable, originada por la presencia de cloruros o sulfuros en el ambiente de trabajo, así como los altos contenidos de oxígeno en el mismo.

Se inicia generalmente con la presencia de estados de tensión externos, esfuerzos residuales, cambios térmicos, generados por procesos de deformación plástica, por ejemplo: flexiones, soldaduras y rellenados. (Raumer, 2013). En la Figura 1.9 se muestra una grieta producto de la corrosión de este tipo.

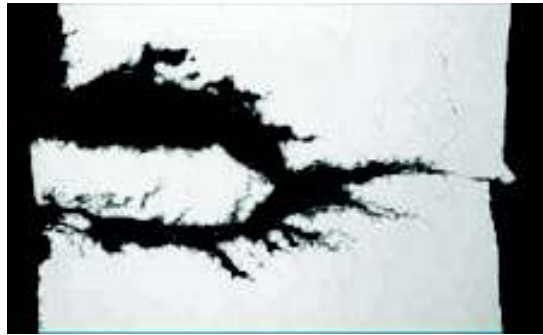


Figura 1.9. Propagación de grieta en la corrosión bajo tensión.

(Fuente: Ibarra & Nuñez, 2010)

Este tipo de corrosión se presenta en forma de fisuras o grietas pequeñas en los lugares que están expuestas a los esfuerzos de tensión. (Ibarra & Nuñez, 2010). Las grietas que se producen poseen una naturaleza frágil y con morfología cristalográfica, originándose después de un tiempo de formación y propagándose en la superficie o de manera local en la punta de la grieta. En la superficie se puede producir este tipo de corrosión debido a reacciones químicas, adsorción de hidrógeno, cloro o iones de sulfuro. En la punta de la grieta también se puede generar una adsorción de hidrógeno, tensiones plásticas debido a imperfecciones geométricas que generan concentradores de esfuerzo.

Para prevenir la corrosión de este tipo se puede remover los medios o sustancias químicas que produzcan la generación de grietas en el acero o durante el proceso de fabricación o deformación en frío.

1.3.5. Corrosión marina

El ambiente marino al cual se encuentra expuesto el acero puede generar problemas de corrosión, que varían según la forma a la que se encuentra expuesto el material, ya sea en atmósfera marina, zona de salpicadura o si el acero se encuentra inmerso en agua de mar. El agua de mar es un medio vivo que contiene varios componentes; organismos biológicos, cloruro de sodio (sal) y gases disueltos; que en ciertas cantidades de concentración generan problemas de oxidación. En una atmósfera marina factores como la temperatura, humedad, viento, contaminación del aire y organismos biológicos determinan la velocidad con la cual se propaga la corrosión en el acero.

En la Figura 1.10 se muestra como la corrosión se inicia con una decoloración en la superficie del material. Si el acero se encuentra inmerso en agua de mar se forma una biopelícula sobre toda la superficie, disminuyendo su propiedad catódica con mayor o menor rapidez según la concentración de sal, temperatura del agua y biodiversidad local.



Figura 1.10. Corrosión marina en aceros Dúplex.

(Fuente: MeteqCo, 2018)

La propagación se da mediante perforaciones en el material y la formación de pequeñas grietas. Para evitar que este fenómeno de oxidación se genere en tiempos cortos se usa aceros con sobre aleaciones como superdúplex, con recubrimientos orgánicos o metálicos que brinden una mejor protección.

2. METODOLOGÍA

En el presente trabajo se estudia y analiza el proceso de corrosión que se puede generar sobre la junta soldada de tubería de acero Dúplex 2205 al emplear un electrodo disímil que brinde una alternativa para evitar problemas de corrosión.

Se realiza una serie de ensayos que permiten sustentar y obtener la información necesaria, para lo cual se utilizan 18 probetas obtenidas de la soldadura de tubería de acero inoxidable Dúplex 2205 de 6 mm de espesor, mediante el proceso de soldadura GTAW con gas de protección (100% Argón), y electrodo ER-2594; en base a normas internacionales (ASTM, AWS, ASME, ASM), se asigna el número de especímenes requeridos para cada ensayo tales como: pruebas de tracción mecánica, ensayos de doblado guiado para calificación de soldadura, ensayos de corrosión y análisis metalográfico.

2.1. Proceso de soldadura GTAW

Este proceso de soldadura es el más idóneo para este tipo de materiales, brindando una soldadura óptima debido a que es un proceso limpio libre de escoria y con baja presencia de defectos.

En los siguientes subcapítulos se explica detalladamente la utilización del material de aporte y de los parámetros de soldadura aplicados.

2.1.1. Preparación material base

Las dimensiones que posea el material base serán influyentes para el diseño geométrico de la junta de soldadura que permita una buena aplicación del proceso de soldadura GTAW (TIG), y la reducción de posibles defectos. Cabe recalcar que todos los procedimientos de preparación se deben hacer en frío ya que así se evitará algún cambio microestructural del material que pueda afectar el estudio.

2.1.2. Selección de material aporte

La resistencia mecánica y la composición química del material son parámetros importantes que se analizan para la selección de un material de aporte; para este trabajo se selecciona la varilla de aporte ER-2594 marca Lincoln, clasificación según la norma AWS A5.9. En la Figura 2.1 se muestra la varilla de aporte ER-2594 en su forma de empaquetado.



Figura 2.1. Varilla de aporte ER-2594 LINCOLN ELECTRIC.

(Fuente: Propia, 2018)

Tabla 2.1. Comparación de propiedades de material base y material aporte.

Material base		Material aporte
Acero Dúplex 2205		Varilla ER 2594
Resistencia Mecánica		
620 MPa mín		870 MPa
Composición Química		
C	0,03 %	0,02 %
Mn	2,0 %	2,5 %
P	0,03 %	0,02 %
S	0,03 %	0,01 %
Si	1,00 %	0,3 %
Cr	21,0 – 23,0%	24,6 %
Ni	4,5 – 6,5 %	8,6 %
Mo	2,5 – 3,5 %	3,8 %
N	0,08 – 0,20 %	0,25 %

(Fuente: ASTM A182/A182M-18, 2017; LINCOLN ELECTRIC, 2013; SOLDEXA, 2017)

Como se observa en la Tabla 2.1. los valores de resistencia mecánica del material de aporte son mayores que el material base. Para la composición química se requiere un material con menor cantidad de carbono que el material base, para evitar la formación de precipitados de carburos que aceleren la corrosión.

2.1.3. Parámetros de soldadura

Los parámetros utilizados durante el proceso de soldadura se sustentan con los documentos respectivos (WPS, PQR, WPQ). (ANEXO II)

2.1.4. Equipos para el proceso de soldadura

El proceso de soldadura se lo realiza en el Laboratorio de Soldadura de la Escuela Politécnica Nacional, el cual presenta un equipo para el proceso de soldadura GTAW. En la Tabla 2.2 se muestran las especificaciones técnicas de esta máquina.

Tabla 2.2. Especificaciones técnicas de la máquina de soldadura GTAW.

Descripción	Especificación	Imagen
Marca	Lincoln Electric	
Modelo	Invertec V350 Pro	
Proceso	GTAW	
Voltaje	10 – 32 [V]	
Amperaje	5 – 315 [A]	
Frecuencia	60 [Hz]	
Fase	1 [Ph]	

(Fuente: Propia)

2.1.5. Procedimiento del proceso de soldadura

- Preparar el material base (tubería) de acuerdo con las dimensiones proporcionadas por el Código ASME SECCIÓN IX, subsección Q462.1 y 462.3.

Tener en cuenta que la preparación de este requiere de procesos en frío.

En la Figura 2.2 se muestra el corte del tubo en una cortadora de disco con agua como medio de enfriamiento y los anillos cortados.

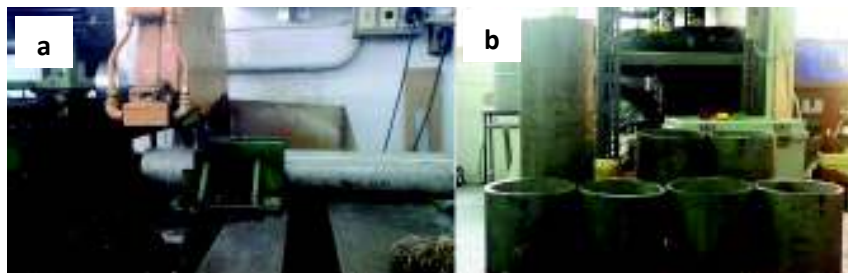


Figura 2.2. a) Corte del tubo en una cortadora de agua, b) Tubo cortado en forma de anillos.

(Fuente: Propia)

- Obtener los biseles en el material base mediante maquinado (torneado).

En la Figura 2.3 se muestra el bisel en forma de "V" a 60°. Este parámetro geométrico se encuentra sustentado en un WPS (ANEXO II).

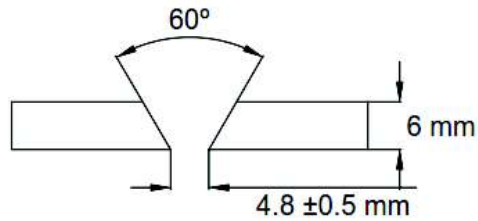


Figura 2.3. Diseño de la junta de soldadura.

(Fuente: Propia)

- Adecuar la punta del electrodo no consumible de Tungsteno por desbaste en forma de punta, esto, debido a que el material a ser soldado es un acero inoxidable.
- Preparar la junta a ser soldada (4 puntos de soldadura en forma de cruz). (Figura 2.4)



Figura 2.4. Preparación de la junta.

(Fuente: Propia)

- Sellar y compactar el material base para su respectiva purgación con el gas de protección Argón (99,99%). (Figura 2.5)



Figura 2.5. Sellado y compactado del material base.

(Fuente: Propia)

- Ubicar y anclar el material base en la posición 6G. (Figura 2.6)



Figura 2.6. Material base en la posición 6G.

(Fuente: Propia)

- Determinar los parámetros adecuados para el proceso (Voltaje, Intensidad) mediante una soldadura de prueba.
- Realizar el primer pase de soldadura (raíz), bajo los parámetros establecidos. (Figura 2.7)



Figura 2.7. Pase de raíz.

(Fuente: Propia)

- Efectuar los pases de relleno según corresponda, en este caso, es necesario 3 pases de relleno adicionales, controlando adecuadamente cada pase. (Figura 2.8)



Figura 2.8. Soldadura de pases de relleno.

(Fuente: Propia)

- Finalmente, realizar una limpieza del cordón de soldadura con la ayuda de una grata y cepillo de acero inoxidable. (Figura 2.9)



Figura 2.9. Limpieza de la soldadura con grata.

(Fuente: Propia)

2.2. Caracterización mecánica

La caracterización mecánica mediante la aplicación de ensayos destructivos permite determinar la capacidad que presenta el material al ser sometido a diferentes tipos de esfuerzos; cuantificando resultados, y basándose en criterios de aceptación proporcionados por las normas internacionales (ASTM, AWS, ASME, ASM), para aceptar o rechazar el procedimiento o material.

Se realizan ensayos de doblado guiado para determinar la calificación de la soldadura, y, de tracción para determinar la resistencia mecánica de la tubería; este procedimiento se realiza bajo normas internacionales (ASTM, ASME), que especifican las dimensiones de las probetas para cada ensayo, y de igual manera los criterios de aceptación o rechazo de estas, así como el número de probetas a ser utilizadas. Los procedimientos y equipos utilizados para cada uno de estos ensayos se encuentran detallados en las siguientes subsecciones.

2.2.1. Ensayo de doblado guiado

Este ensayo permite evaluar la calidad de la soldadura y determinar si la presencia de indicaciones o imperfecciones en el cordón de soldadura afectará o no su comportamiento. En la Figura 2.10 se muestra un esquema de la forma en la que se realiza este ensayo.

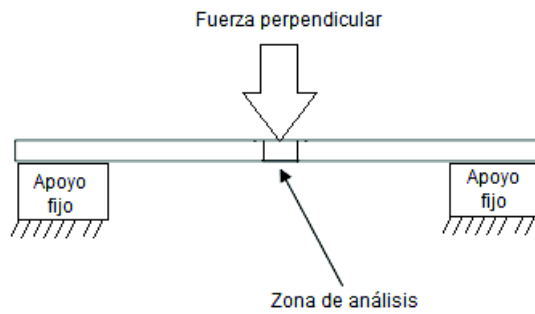


Figura 2.10. Esquema del ensayo de doblado guiado.

(Fuente: Propia)

Los tipos de ensayo de doblado que se aplican son:

- Ensayo de doblado transversal de cara: Se denomina así debido a la superficie con mayor ancho de la soldadura. Según el Código ASME sección IX subsección QW-161.1, establece que el ensayo se realiza mediante la aplicación de una fuerza perpendicular a la soldadura.
- Ensayo de doblado transversal de raíz: Denominado así por la aplicación del ensayo sobre la superficie con menor ancho de soldadura o en la raíz de esta. Este ensayo se rige al Código ASME sección IX subsección QW-161.2.

2.2.1.1. Probetas para ensayo de doblado guiado

Para realizar ensayos de doblado guiado, las dimensiones de los especímenes se encuentran detalladas en el Código ASME Sección IX, subsección QW 462.3 (a). (Figura 2.11). El número de especímenes a analizar esta detallada en la subsección QW-451.1, ver ANEXO III.

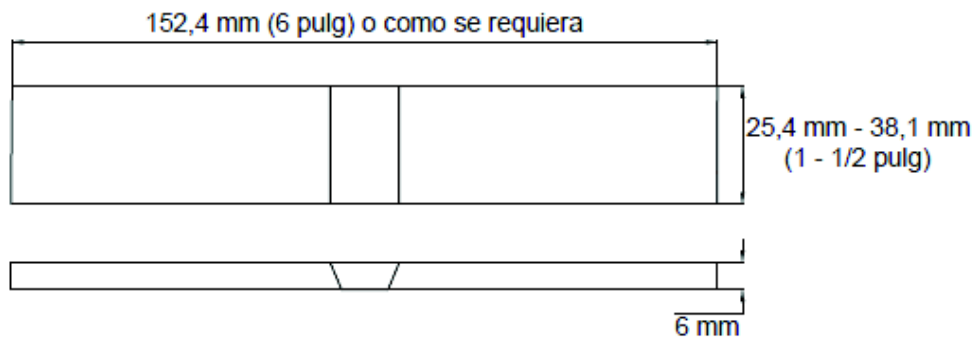


Figura 2.11. Dimensión de Probetas para ensayos de doblado guiado.


(Fuente: CODIGO ASME SECCION IX, 1998)

NOTA: El refuerzo de soldadura y tira de respaldo o el anillo de respaldo, si existen, serán removidos a ras con la superficie del espécimen. No corte con flama el material no ferroso. (CODIGO ASME SECCION IX, 1998)

2.2.1.2. Equipo para ensayo de doblado guiado

Este ensayo se realiza en el Laboratorio de Soldadura de la Escuela Politécnica Nacional, tanto para el doblado de cara como para el de raíz. Este laboratorio presenta el equipo adecuado para la realización del ensayo y sus especificaciones técnicas se detallan en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Especificaciones técnicas de la máquina de doblado guiado.

Descripción	Especificación	Imagen
Nombre	Máquina Hidráulica	
Proceso	Ensayo de Doblado	
RPM (Compresor)	1720	

(Fuente: Propia)

2.2.1.3. Procedimiento de ensayo de doblado guiado

- Extraer las probetas de la tubería soldada según lo mencionado en la subsección 2.2.1.1.
- Clasificar las probetas a ser ensayados, tanto de doblado de cara como de raíz.
- Encender y calibrar la máquina de doblado.
- Ubicar las probetas en la máquina y aplicar la carga hasta que las probetas adquieran la forma convexa.
- Retirar las probetas y realizar un análisis visual para su posterior aceptación o rechazo de las mismas.

2.2.2. Ensayo de tracción

Este ensayo permite obtener información cuantitativa acerca del límite de fluencia y resistencia a la rotura que presenta el material ensayado.

Para este trabajo se realiza el ensayo de tracción tanto al material soldado, con el fin de establecer una comparación de valores de resistencia a la rotura.

2.2.2.1. Probetas para ensayos de tracción

En la Figura 2.12 se muestran los criterios de aceptación y dimensiones que se encuentran detallados en el Código ASME sección IX artículo 1 (QW 153) para aceptación, y en la QW-462.1 (b) para dimensionamiento. El número de especímenes a analizar se determina por el espesor de la tubería y esta detallada en la subsección QW-451.1, ver ANEXO III.

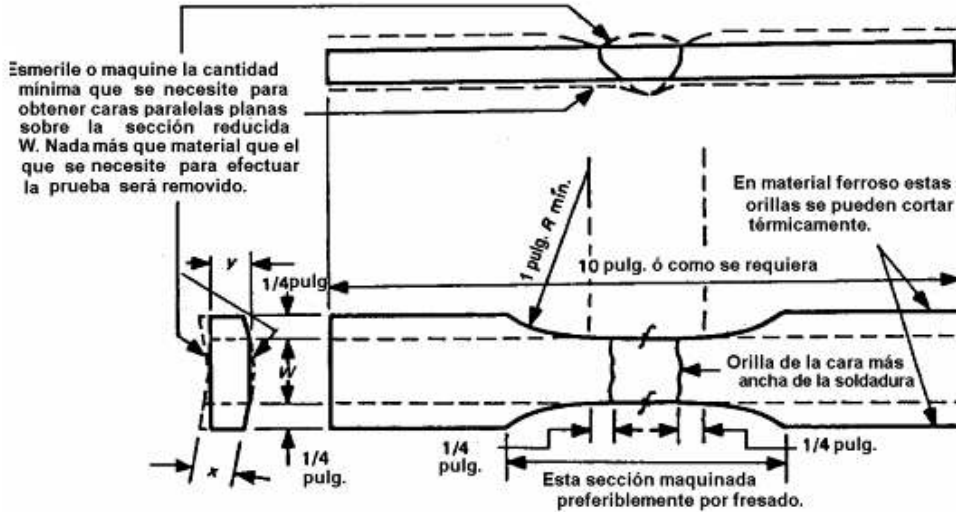


Figura 2.12. Dimensiones de probeta para ensayo de tracción.

(Fuente: CODIGO ASME SECCION IX, 1998)

2.2.2.2. Equipo para ensayo de tracción

El ensayo se lo realiza en el Laboratorio de Esfuerzos y Vibraciones de la Escuela Politécnica Nacional en una máquina universal de ensayos y sus especificaciones técnicas se detallan en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Especificaciones técnicas de la máquina universal de ensayos.

Descripción	Especificación	Imagen
Nombre	Máquina Universal de Ensayos	
Marca	TINIUS OLSEN	
Modelo	SÚPER L	
Proceso	Ensayo de Tracción	
Capacidad de carga	3000 KN	
Aplicación de carga	Sistema Hidráulico	

(Fuente: Propia)

2.2.2.3. Procedimiento de ensayo de tracción

- Extraer las probetas de la tubería soldada según lo mencionado en la subsección 2.2.2.1.
- Preparar la Máquina Universal de Ensayos en base a las medidas de las probetas (longitud, ancho, espesor, cordón de soldadura).
- Colocar y asegurar la probeta en la máquina para proceder con el ensayo.
- Documentar los datos obtenidos que nos registra el software que posee la máquina, para un posterior análisis.
- Retirar la probeta de la máquina.

2.3. Ensayo de corrosión

El ensayo de corrosión permite simular ambientes corrosivos modificando ciertos parámetros como temperatura, volumen, método de inmersión, tiempo total del ensayo, composición de la solución, etc., esto con el fin de determinar la resistencia y comportamiento a la corrosión de los metales en cuestión.

Este trabajo experimental aplica el método de corrosión por pruebas de inmersión total, el cual busca analizar el tipo de comportamiento del material base, zona afectada por el calor y el cordón de soldadura, al tipo de corrosión bajo esfuerzos mediante la exposición de los especímenes de prueba en ambientes salinos en Quito y Guayaquil a las mismas condiciones. Se toma como referencia el trabajo “Estudio y análisis microestructural del proceso acelerado de corrosión presentado en tuberías de acero dúplex 2205 soldadas mediante proceso GTAW” (Bastidas & Pila, 2018), con el fin de realizar un análisis comparativo de resultados.

2.3.1. Probetas para ensayo de corrosión

Se extrajeron 12 especímenes de la tubería soldada para una comparación de resultados en dos ambientes corrosivos, 6 se utilizan en Quito y 6 en Guayaquil, por tal motivo todos los especímenes en una serie de prueba deben tener las mismas dimensiones.

En la Figura 2.13 se muestra las dimensiones de los especímenes para el ensayo de corrosión como sugiere “Stress Corrosion Testing” (American Society for Testing and Materials, 2014).

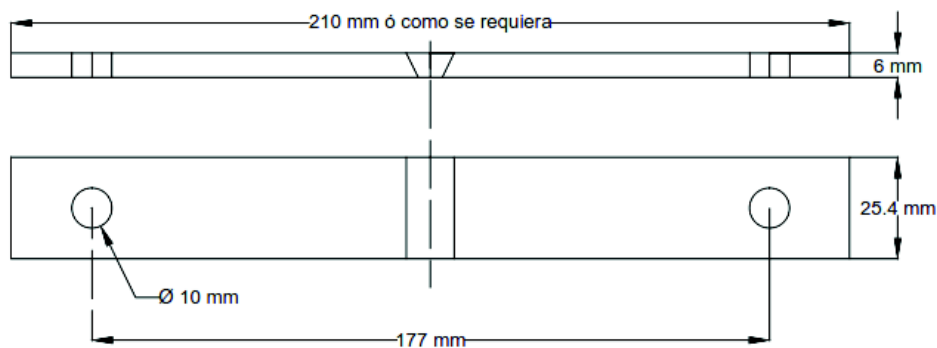


Figura 2.13. Dimensiones de probeta para ensayo de corrosión.

(Fuente: Propia)

2.3.2. Corrosión bajo esfuerzos

Como se mencionó anteriormente se tomaron los parámetros como: tiempo de corrosión, composición salina, fuerza aplicada a los especímenes del trabajo realizado por (Bastidas & Pila, 2018).

El tiempo de ensayo de corrosión tiene una duración de 2160 horas (90 días) para los especímenes en Quito y Guayaquil, con un periodo de revisión de cada 15 y 30 días respectivamente.

La composición salina está constituida por 5 partes de masa de cloruro de sodio disueltas en 90 partes de agua destilada; además, se añade 5 partes de cloro líquido a la composición, como se indica en la Norma ASTM D1193. Sección 8.1 (ASTM D1193, 2018). Estos compuestos químicos se muestran en la Tabla 2.5. Para el ensayo en la ciudad de Guayaquil la composición salina utilizada es agua de mar.

Tabla 2.5. Compuestos químicos de la composición salina.

Descripción	Imagen	Descripción	Imagen
Cloruro de Sodio 99.5% de pureza		Cloro líquido 10% de pureza	

(Fuente: Propia)

La temperatura de ensayo está en un rango de 28°C – 30°C para asemejar la temperatura costanera de la ciudad de Guayaquil.

El pH medido, tanto para la composición salina como para el agua de mar, está un rango entre 7 – 8.

La fuerza o carga aplicada a los especímenes no debe exceder el límite elástico del material. Se lo realiza mediante la aplicación de un torque que permita mantener a los especímenes a carga constante durante el tiempo de ensayo. En la Tabla 2.6 se detalla el torque aplicado a cada uno de los especímenes

Tabla 2.6. Torques asignados para cada espécimen.

Quito		Guayaquil	
Id	Torque [Nm]	Id	Torque [Nm]
UIO 1_1	2,71	GYE 1_1	2,71
UIO 1_2	5,42	GYE 1_2	5,42
UIO 1_3	8,13	GYE 1_3	8,13
UIO 2_1	2,71	GYE 2_1	2,71
UIO 2_2	5,42	GYE 2_2	5,42
UIO 2_3	8,13	GYE 2_3	8,13

(Fuente: Propia)

Para aplicar las fuerzas y torques a los especímenes es necesario la construcción de un porta-probetas de hierro fundido que sea resistente a los esfuerzos a los que estará sometido. Mediante soldadura se ancla 6 pernos de acero inoxidable donde se colocarán los especímenes. Esto simula que la distribución de la carga sea en tres puntos, en los extremos del espécimen y en el cordón de soldadura como se muestra en la Figura 2.14.

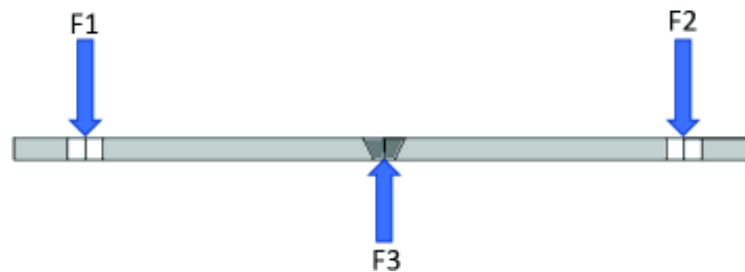


Figura 2.14. Diagrama de distribución de cargas en los especímenes.

(Fuente: Propia)

En la Figura 2.15 y Figura 2.16 se muestra las dimensiones del porta-probetas y la colocación de los especímenes en el mismo.

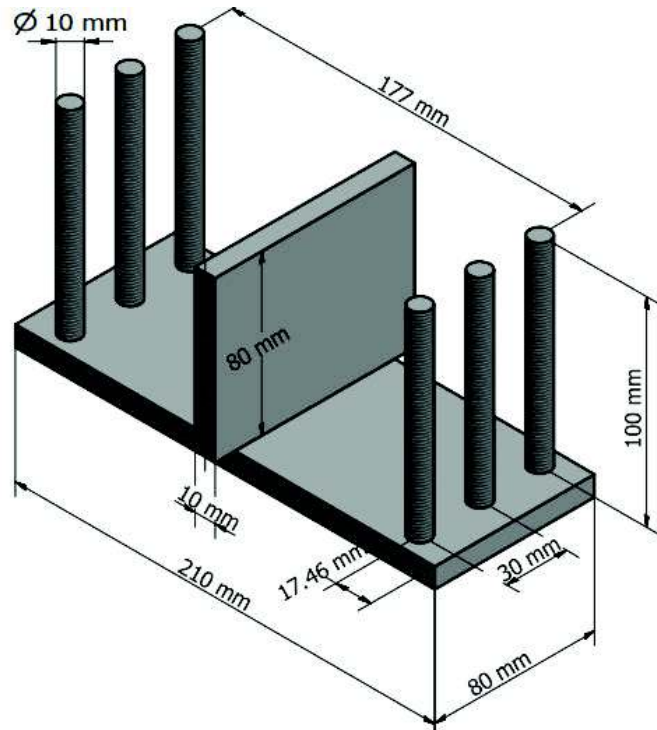


Figura 2.15. Dimensiones del porta-probetas.

(Fuente: Propia)

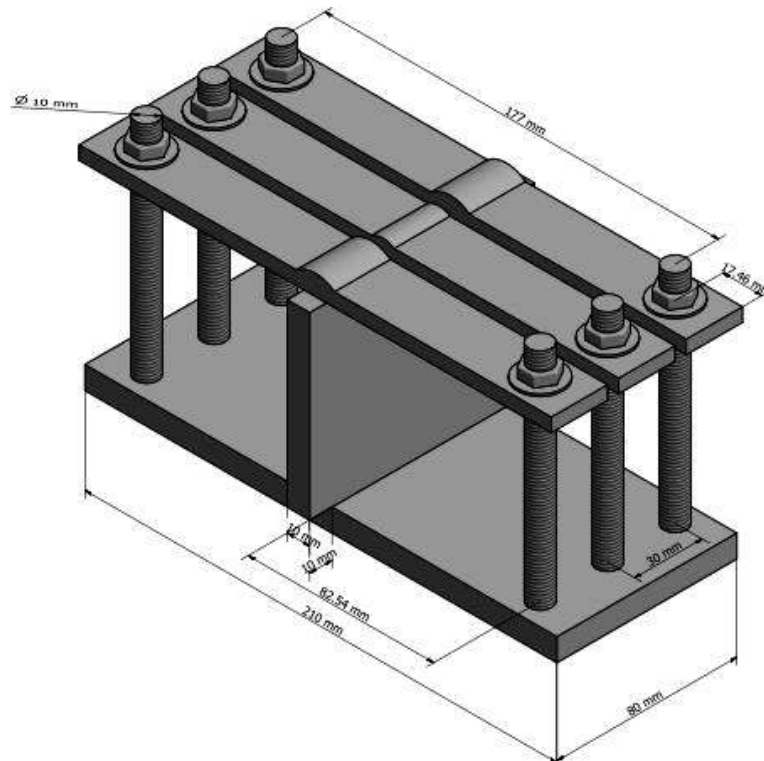


Figura 2.16. Ubicación de los especímenes en el porta-probetas.

(Fuente: Propia)

Se debe evitar el contacto entre los especímenes y el porta-probetas, para lo cual se usa pintura anticorrosiva y durante el montaje de estos, en los puntos de contacto se coloca material aislante.

Cabe recalcar que se construyen 4 porta-probetas para colocar 3 especímenes en cada uno y realizar el ensayo de corrosión con 6 especímenes en Quito y 6 en Guayaquil.

2.3.3. Velocidad de corrosión

La variación de la masa se lo calcula como se indica en la Ecuación 2.1 parámetro que es muy importante para el cálculo de la velocidad de corrosión.

$$W = W_i - W_f$$

Ecuación 2.1. Cálculo de la variación de la masa.

(Fuente: Sáenz, Castillo, & Márquez, 2010)

Donde:

W : Pérdida de peso [g]

W_f : Peso final [g]

W_i : Peso inicial [g]

La velocidad de corrosión se determina en base a la Ecuación 2.2.

$$CR = \frac{K \cdot W}{A \cdot d \cdot t}$$

Ecuación 2.2. Cálculo de la velocidad de corrosión.

(Fuente: González, 2015)

Donde:

CR: Velocidad de corrosión

W : Pérdida de peso [g]

K : Constante de transformación de unidades [$8,76 \times 10^4$ mm/año]

A : Área promedio inicial que será expuesto al medio corrosivo [cm^2]

d : densidad del material [g/cm^3] [Dúplex 2205 = $7.80 \text{ g}/\text{cm}^3$]

t : tiempo de exposición en horas [h]

2.3.4. Equipo para ensayo de corrosión

Las herramientas e instrumentos utilizados durante el proceso de corrosión son: recipiente plástico, focos incandescentes, papel térmico, arduino, sensor de temperatura, termocupla digital, display electrónico, potenciómetro regulador de intensidad de luz. En la Figura 2.17 se muestran los elementos unidos formando la cámara salina.

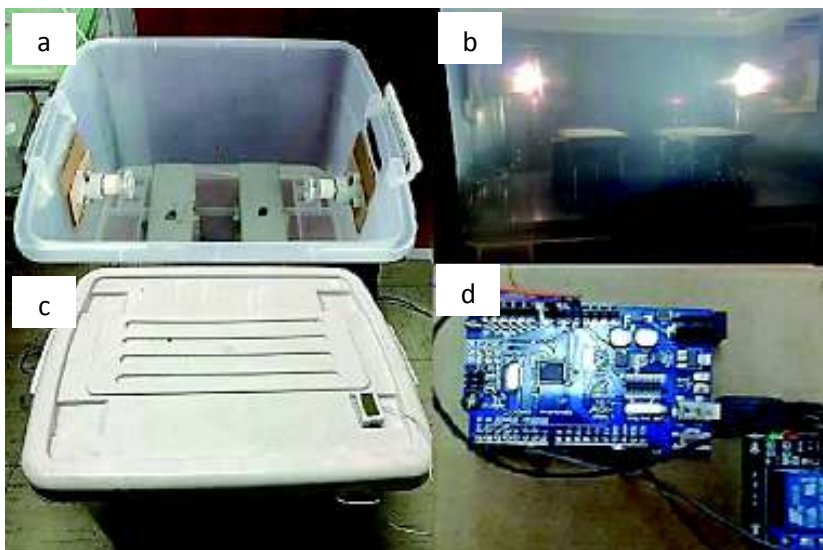


Figura 2.17. Medio de corrosión acelerada, a) ubicación de los focos incandescentes, b) cámara en funcionamiento, c) sellado de cámara para evitar pérdidas de calor, d) arduino controlador de temperatura.

(Fuente: Propia)

Para la aplicación de los torques respectivos se utilizó un torquímetro con las especificaciones técnicas detalladas en la Tabla 2.7.


Tabla 2.7. Especificaciones técnicas del torquímetro digital.

Descripción	Especificación	Imagen
Nombre	Digital Torque Wrench	
Marca	Eclartorq	
Modelo	ADE2-030BN	
Escalas	Nm – lbf/ft	
Rango de Torque	0 – 30 [Nm] 0 – 22 [lbf/ft]	
Tipo de lectura	Digital	

(Fuente: Propia)

Para la medición de la masa durante el ensayo de corrosión se utilizó una balanza digital cuyas especificaciones técnicas se encuentran detalladas en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8. Especificaciones técnicas de la balanza digital.

Descripción	Especificación	Imagen
Nombre	Balanza digital	
Marca	N/A	
Modelo	N/A	
Capacidad	0 – 500 [g]	
Apreciación	0,01 [g]	
Tipo de lectura	Digital	

(Fuente: Propia)

2.3.5. Procedimiento para ensayo de corrosión Quito

- Realizar la programación del Arduino para mantener un control de temperatura entre 28°C y 30°C, mediante la colocación de un sensor de temperatura dentro del recipiente plástico que tabulará datos los cuales son mostrados en el display electrónico, de igual manera se puede controlar la temperatura manualmente con la colocación de un potenciómetro que regula intensidad de los focos y la colocación de una termocupla digital.
- Colocar los especímenes en los porta-probetas con los torques respectivos.
- Preparar la composición salina que se colocará en el recipiente plástico en un volumen de 4 litros, cantidad necesaria para cubrir las superficies de los especímenes en su totalidad.
- Ubicar el porta-probetas con los especímenes dentro del recipiente plástico. Encender los focos, el arduino y los dispositivos electrónicos, colocar la tapa del recipiente para mantener la temperatura dentro del rango.
- Como se mencionó en la subsección 2.3.2. el tiempo de ensayo de corrosión recomienda una duración de 2160 horas. Durante este período se realiza una inspección visual de los especímenes cada 15 días para evaluación, limpieza mediante agua tibia y acetona incluido el porta-probetas, toma de fotografías del cordón de soldadura y la zona afectada por el calor, medición de masa para determinar pérdidas, limpieza del recipiente plástico y reemplazo de la composición salina anterior por una más limpia. Además, se realiza el mismo procedimiento de montaje de los especímenes en el porta-probetas con su debido torque. (Tabla 2.9)

Tabla 2.9. Procedimiento de evaluación de corrosión cada 15 días.

	
<p>Especímenes en ensayo de corrosión</p>	<p>Porta-probetas</p>
	
<p>Limpieza de especímenes</p>	<p>Limpieza de porta-probetas</p>
	
<p>Medición de masa</p>	<p>Toma de fotografías</p>
	
<p>Montaje de especímenes con su respectivo torque</p>	<p>Cambio de composición salina por una más limpia y ubicación de especímenes dentro</p>

(Fuente: Propia)

- Finalmente, al cumplir el tiempo total del ensayo se desmonta los especímenes realizando una limpieza de las capas de óxido e impurezas como se mencionó

anteriormente para una posterior toma de fotografías de las zonas en análisis en el microscopio metalográfico (macrografías), de igual manera se toma medidas de masa para realizar una comparación entre datos iniciales y finales.

2.3.6. Procedimiento para ensayo de corrosión Guayaquil

- Una vez situados en Guayaquil, se procede a llenar el medio de corrosión acelerada con aproximadamente 3 litros de agua de mar.
- Ubicar las probetas ya montadas en el porta-probetas con su respectivo torque; las probetas deben estar colocadas de tal forma que se sumerjan en el agua de mar.
- Con la ayuda de una tapa, sellar el medio caustico, con el fin de evitar la presencia de contaminación.
- Evaluar dicho procedimiento en intervalos de tiempo de 30 días; obtener fotografías del comportamiento del material en este medio corrosivo; realizar limpieza de cada una de las probetas ensayadas.
- Anclar las probetas en el porta-probetas con sus respectivos torques.
- Colocar las probetas en conjunto con el porta-probetas en el medio de corrosión acelerada.

2.4. Análisis metalográfico

Un análisis metalográfico nos permite obtener información acerca de la microestructura que presenta el material, en este caso la tubería de acero Dúplex y la soldadura; además, la dureza mediante un mapeo.

2.4.1. Metalografías

Las metalografías de un material permiten determinar las características microestructurales relacionadas con sus propiedades físicas, químicas y mecánicas. Estableciendo así las fases ferríticas, austeníticas presentes en el material base, además de los cambios de fases presentados dentro del cordón de soldadura y la zona afectada por el calor, determinación del tamaño de grano, crecimiento y cambios producidos por la soldadura.

2.4.1.1. Probetas para análisis metalográfico

Para la preparación de las probetas se corta muestras del material base y del cordón de soldadura alrededor de 30 x 30x 6 mm mediante un corte transversal de los especímenes seleccionados para el análisis, que montadas sobre resina facilitan una mejor manipulación

de estas. En la Figura 2.18 se muestra las probetas utilizadas para el análisis metalográfico del material base y de la junta soldada.

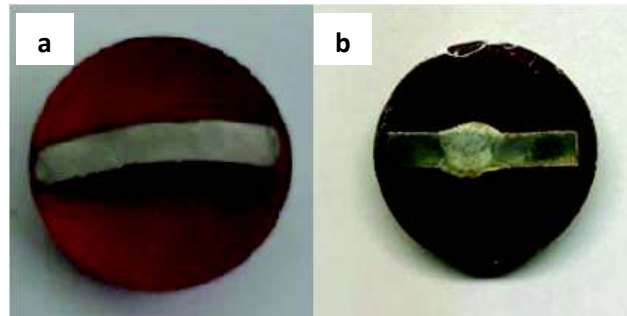


Figura 2.18. a) Probeta del material base, b) Probeta de la soldadura.

(Fuente: Propia)

2.4.1.2. Equipo para análisis metalográfico

El análisis se lo realiza en el Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla de la Escuela Politécnica Nacional. Se utilizan herramientas como sierras de mano, flexómetro, calibrador, marcador metálico, así como las máquinas que permiten el desbastado grueso, desbaste fino, pulido y finalmente los microscopios metalográficos. En la Tabla 2.10 se muestran las especificaciones técnicas de la máquina desbastadora de disco utilizada.


Tabla 2.10. Especificaciones técnicas de la máquina desbastadora de disco.

Descripción	Especificación	Imagen
Nombre	Máquina desbastadora de disco	
Marca	BUEHLER	
Modelo	121-0M-84	
Voltaje	220 V	
Amperaje	6.2 A	
Potencia del motor	1 HP	
Núm. Abrasivo	100 granos/pulg ²	
Medio de enfriamiento	Agua	

(Fuente: Propia)


En la Tabla 2.11 se muestran las especificaciones técnicas de las lijadoras a mano utilizadas. En la Tabla 2.12 se muestran las especificaciones técnicas de la máquina pulidora de paño utilizada; esta máquina usa como lubricante la alumina.

Tabla 2.11. Especificaciones técnicas de la lijadora a mano y lijas.

Descripción	Especificación	Imagen
Nombre	Banco pulido fino	
Marca	BUEHLER	
Modelo	NO. 39-1470 AB	
Núm. abrasivo	240, 320, 400, 600, 1500 granos/pulg ²	
Medio de enfriamiento	Agua	

(Fuente: Propia)

Tabla 2.12. Especificaciones técnicas de la máquina de pulido de paño.

Descripción	Especificación	Imagen
Nombre	Pulidora de paño	
Marca	BUEHLER	
Modelo	115-RM-1756	
Voltios	115 V	
Potencia	1 HP	
Abrasivo	Alumina	
Medio de enfriamiento	Agua	

(Fuente: Propia)




Figura 2.19. Reactivos químicos, a) Marble, b) Agua regia.

(Fuente: Propia)

En la Figura 2.19 se muestran los reactivos químicos utilizados para el respectivo ataque químico de las probetas; marble para el metal base y agua regia para la soldadura; esto, para mejorar la óptica de la microestructura del material. En la Tabla 2.13 y Tabla 2.14 se


muestran las especificaciones técnicas del microscopio metalográfico y del macroscopio metalográfico utilizados.

Tabla 2.13. Especificaciones técnicas del microscopio metalográfico (micrografías).

Descripción	Especificación	Imagen
Nombre	Microscopio Metalográfico	
Marca	OLYMPUS	
Modelo	GX41F	
Voltaje	100-120/ 230-240 V	
Frecuencia	50/60 Hz	
Indicadores de aumentos de zoom	50X, 100X, 500X, 1000X	
Potencia del motor	85 VA 40 W	
Software	Stream Essentials	

(Fuente: Propia)

Tabla 2.14. Especificaciones técnicas del microscopio metalográfico (macrografías).

Descripción	Especificación	Imagen
Nombre	Macroscopio Metalográfico	
Marca	OLYMPUS	
Modelo	SZX7	
Voltaje	100-120/ 230-240 V	
Frecuencia	50/60 Hz	
Indicadores de aumentos de zoom	0.8X, 1X, 1.25X, 1.6X, 2X, 2.5X, 3.2X, 4X, 5X, 5.6X	
Iluminación	Guías de fibra óptica	
Software	Stream Essentials	

(Fuente: Propia)

2.4.1.3. Procedimiento para análisis metalográfico

- **Corte de probetas:** Cortar utilizando sierras manuales controlando que la temperatura de corte no sea elevada así se evitará cambios en la microestructura. Las dimensiones se establecen en la sección 2.4.1.1.

- **Montaje de probetas:** Colocar las probetas en moldes circulares de 37 mm de diámetro, y con la ayuda de resina plástica, cobalto y un catalizador se procede al montaje con un tiempo de secado de 120 minutos. Posteriormente, se procede al desmontaje de las probetas.
- **Desbaste grueso:** Colocar las probetas en la desbastadora de disco para eliminar excesos de resina, para así, obtener una superficie horizontal.
- **Desbaste fino:** Utilizar lijas de agua correspondientes a la serie de números: 200, 400, 600 y 1500; esto, con la finalidad de reducir la profundidad de las líneas generadas gracias al desbaste grueso.
- **Pulido:** Utilizar la pulidora de paño junto con alumina para eliminar la poca profundidad de las líneas provenientes del desbaste fino, consiguiendo de esta manera, una superficie similar a la de un espejo.
- **Ataque Químico:** Exponer la superficie de la probeta al contacto con componentes químicos como son: marle y agua regia, durante 5 segundos. Luego, lavar con agua y frotar la superficie con algodón para evitar rayones. Finalmente se rocía con alcohol la superficie atacada químicamente para evitar la oxidación. Todo este proceso se lo realiza con el fin de visualizar las fases microestructurales y tamaño de grano en los microscopios metalográficos.
- **Representación mediante fotografías:** Colocar la probeta en el microscopio metalográfico para el análisis, tanto micrográfico como macrográfico, y, con la ayuda del programa Stream Essentials se capturan las imágenes requeridas, y se almacena en un computador.

2.4.2. Micro-dureza

Es un tipo de ensayo de penetración que genera una huella superficial en el orden de micrones. Se lo aplica a especímenes con el fin de caracterizar el comportamiento de las estructuras cristalinas que posee el material, siendo factible realizar la indentación sobre un grano monofásico o sobre una fase homogénea.

2.4.2.1. Probetas para ensayo de micro-dureza

Se puede utilizar las probetas que fueron usadas para los ensayos metalográficos manteniendo un paralelismo entre las caras indicando cuales son las zonas de análisis, en este caso realizar indentaciones en el material base, zona afectada por el calor y en el cordón de soldadura.

2.4.2.2. Equipo para ensayo de micro-dureza

En la Tabla 2.15 se muestra muestran las especificaciones técnicas del equipo utilizado para el ensayo de micro-dureza.

Tabla 2.15. Especificaciones técnicas del equipo de ensayo de micro-dureza.

Descripción	Especificación	Imagen
Nombre	Microdurómetro	
Marca	Metkon	
Modelo	DUROLINE-M	
Aumentos ópticos	10X, 20X, 40X	
Carga	10 – 1000 [gf]	
Tiempo de carga	5 – 99 [s]	
Tipo de lectura de datos	Digital	

(Fuente: Propia)

2.4.2.3. Procedimiento para ensayo de micro-dureza

- Preparar la máquina para el ensayo de micro dureza con los parámetros como valor de carga y tiempo de aplicación de esta que dependerán del tipo de material de estudio. (Para el acero Dúplex 2205 se utilizó una carga de 300 [gramos fuerza] con un tiempo de aplicación de 15 s).
- Colocar la probeta sobre la máquina y realizar las indentaciones a una distancia constante de 1 mm una de otra dentro del material base, zona afectada por el calor y el cordón de soldadura.
- Tabular los resultados y mediante el Software KAMERA del equipo obtener los valores de dureza en cada uno de los puntos donde se realizó el ensayo.

2.4.3. Dureza

El ensayo de dureza establece que resistencia posee un material a la deformación permanente ocasionada por la indentación de otro material con mayor dureza. La escala para cuantificar los valores de dureza depende del material, indentador utilizado y carga aplicada. Este ensayo se realiza con el fin de establecer una comparación de los valores obtenidos antes de iniciar el ensayo de corrosión y al final para interpretar el comportamiento del material en este aspecto.

2.4.3.1. Probetas para ensayo de dureza

Las probetas usadas para los ensayos metalográficos pueden ser usadas para el ensayo de dureza manteniendo un paralelismo entre las dos superficies.

2.4.3.2. Equipo para ensayo de dureza

El ensayo se realiza en el Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla de la Escuela Politécnica Nacional el cual consta del equipamiento calibrado y necesario para la aplicación de este. En la Tabla 2.16 se muestran las especificaciones técnicas del equipo utilizado para el ensayo de dureza.

Tabla 2.16 Especificaciones técnicas del equipo de ensayo de dureza.

Descripción	Especificación	Imagen
Nombre	Durómetro Rockwell	
Marca	Hardrocker	
Modelo	HR 150-A	
Carga	60, 100, 150 [kgf]	
Escalas	Rockwell (A, B, C)	
Tipo de lectura de datos	Analógico	

(Fuente: Propia)

2.4.3.3. Procedimiento para ensayo de dureza

- Preparar la máquina de ensayo de dureza y colocar el indentador correspondiente. (Acero Dúplex 2205 usar un indentador para escala HRC)
- Ubicar la probeta en la máquina
- Aplicar la fuerza correspondiente a la escala por unos 10 segundos y descargar.
- Repetir el procedimiento para los puntos necesarios en el metal base, zona afectada por el calor y cordón de soldadura, separados a una misma distancia a lo largo de la superficie de la probeta.
- Tabular los resultados.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al presente capítulo le corresponden el respectivo detalle de los resultados obtenidos de los distintos ensayos realizados, enfocándose en los requerimientos de las normas establecidas en puntos anteriores. Llegando a validar o rechazar cada uno de los procesos descritos en este trabajo.

3.1. Resultados

A continuación, se detallan cada uno de los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos realizados, indicando: microestructuras obtenidas, valores de resistencia, parámetros de soldadura y corrosión tanto para Quito y Guayaquil. Para un posterior análisis de resultados.

3.1.1. Proceso de soldadura

En la Tabla 3.1 se muestran los valores de los parámetros con los que se realizó la soldadura. Los valores de calor de entrada son calculados mediante la Ecuación 3.1.

$$\text{Calor de entrada} = \frac{V \cdot A}{S \cdot 1000}$$

Ecuación 3.1. Cálculo del calor de entrada.

(Fuente: Association, 2012)

Donde:

Calor de entrada: [KJ/mm]

V: Tensión [Voltios]

A: Intensidad [Amperios]

S: velocidad de avance [mm/s]

Tabla 3.1. Parámetros de soldadura.

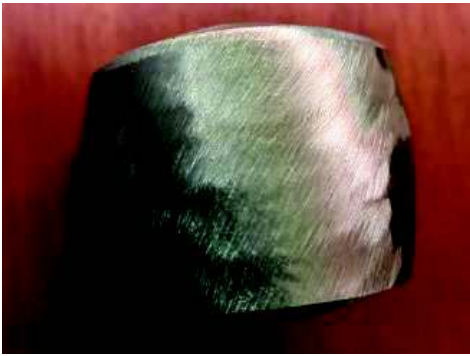

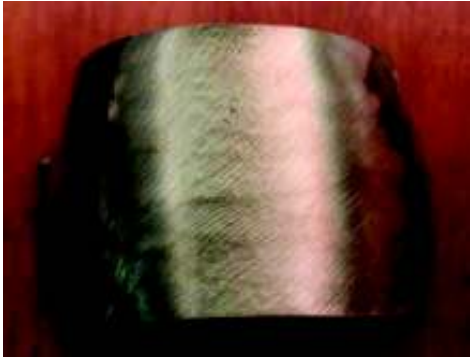



Nº Pase	Metal de aporte	Corriente	Voltaje	Velocidad de avance	Calor de entrada
	Díámetro (mm)	Amperios	Voltios	mm/min	KJ/mm
1	2,38	73	10	21,57	2,03
2	2,38	94	10	22,41	2,52
3	2,38	99	10	23,25	2,55
4	2,38	94	10	24,09	2,34

(Fuente: Propia)

3.1.2. Ensayo de doblado guiado

Al obtener los resultados, tanto del ensayo de doblado de cara y de raíz, se observa que no se presentan ningún tipo de imperfecciones en la soldadura. A continuación, en la Tabla 3.2 se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de doblado de cara y de raíz, respectivamente.

Tabla 3.2. Especímenes sometidos al ensayo de doblado guiado.

Doblado de cara		
S-1		
	No presenta discontinuidades	No presenta discontinuidades
S-2		
	No presenta discontinuidades	No presenta discontinuidades
Doblado de raíz		
S-3		
	No presenta discontinuidades	No presenta discontinuidades

S-4		
	No presenta discontinuidades	No presenta discontinuidades

(Fuente: Propia)

3.1.3. Ensayo de tracción

Las probetas ensayadas tienen resistencia a la tracción como se muestra en la Tabla 3.3. Para respaldar esta información en el ANEXO IV se encuentra detallado el informe técnico de dicho ensayo.

Tabla 3.3. Resultados de los ensayos de tracción.

Id	Ancho	Espesor	Carga Máxima registrada		Resistencia a la tracción		Observaciones
	Promedio mm	Promedio mm	lbf	N	Ksi	MPa	
T-1	22,48	5,97	24400	108537	117,3	808,7	Falla metal base
T-2	23,17	5,97	23300	103644	108,7	749,3	Falla cordón de soldadura

(Fuente: LAEV, 2018)

En la Figura 3.1, Figura 3.2, Figura 3.3 y Figura 3.4 se muestran las zonas de fractura de la probeta T-1 y T-2 respectivamente.



Figura 3.1. Fractura de la probeta T-1 (cara frontal).

(Fuente: Propia)



Figura 3.2. Fractura de la probeta T-1 (cara posterior).

(Fuente: Propia)



Figura 3.3. Fractura de la probeta T-2 (cara frontal).

(Fuente: Propia)



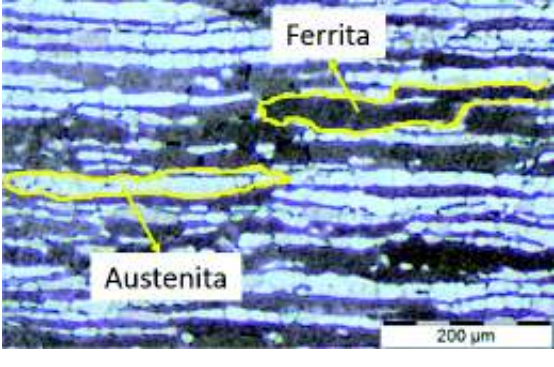
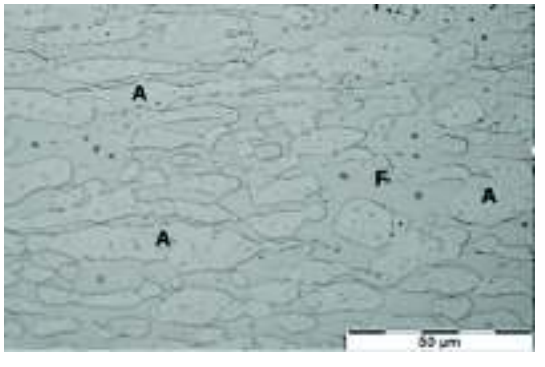
Figura 3.4. Fractura de la probeta T-2 (cara posterior).

(Fuente: Propia)

3.1.4. Metalografías metal base, zona afectada por el calor y cordón de soldadura

En la metalografía del material base se muestran las fases ferrita, austenita, con un aumento óptico de 100X y 500X. (Tabla 3.4)

Tabla 3.4. Metalografías del metal base.

Microestructura bifásica del metal base en aumento 100X	Microestructura bifásica del metal base en aumento 500X
 <p>A micrograph showing a bifasic metal base structure at 100X magnification. The image displays a layered structure with alternating dark and light regions. Labels 'Ferrita' and 'Austenita' are present with arrows pointing to the respective phases. A scale bar at the bottom right indicates 200 μm.</p>	 <p>A micrograph showing a bifasic metal base structure at 500X magnification. The image displays a more detailed view of the metal base structure, showing a network of dark and light regions. Labels 'A' and 'F' are present with arrows pointing to the respective phases. A scale bar at the bottom right indicates 50 μm.</p>
<p>El metal base presenta las fases: ferrita (zona más oscura), austenita (zona más clara).</p>	<p>El metal base presenta dos fases: ferrita (F) y austenita (A).</p>

(Fuente: Propia)

En la Figura 3.5 se observa la distribución de las diferentes zonas: metal base (MB), zona afectada por el calor (ZAC) y cordón de soldadura (CS).

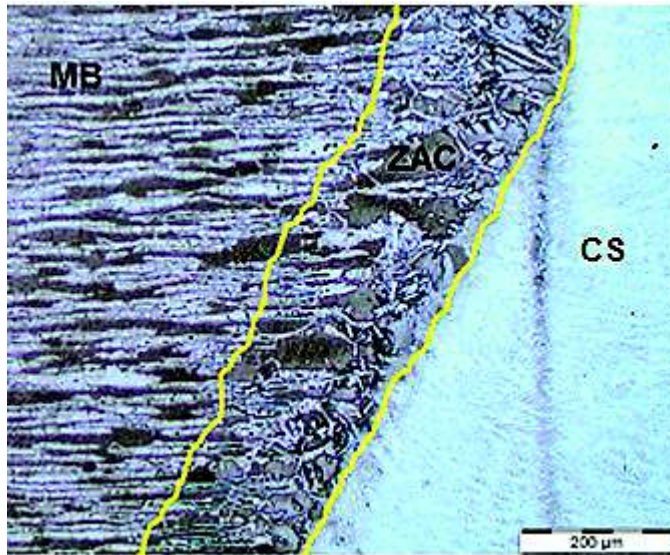


Figura 3.5. Metalografía de la distribución de las zonas: metal base, zona afectada por el calor y cordón de soldadura.

(Fuente: Propia)

La zona afectada por el calor presenta un cambio microestructural y aumento de la fase ferrítica en relación con la fase austenítica γ y la formación de fases secundarias. (Figura 3.6)

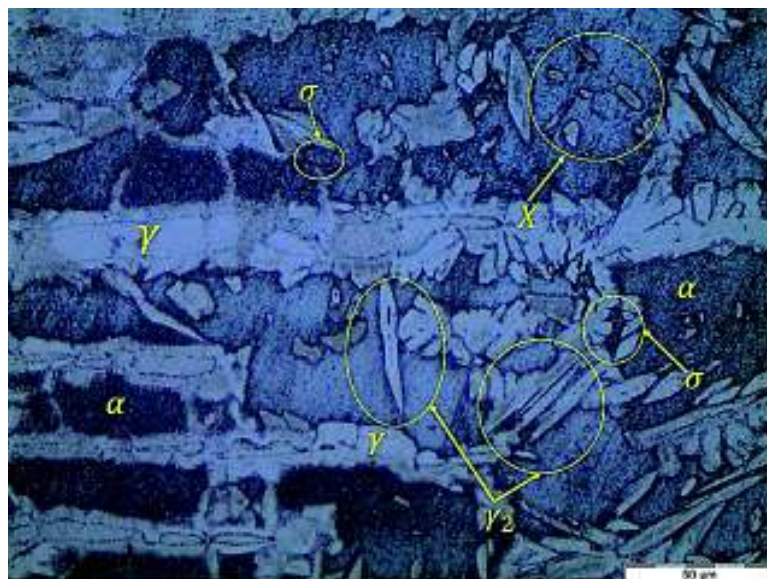
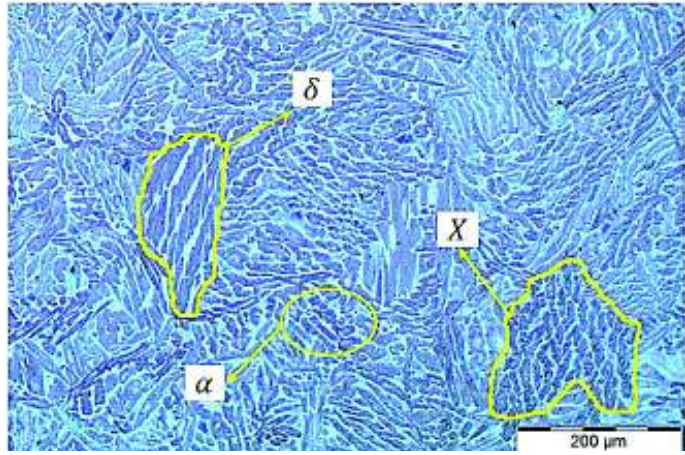
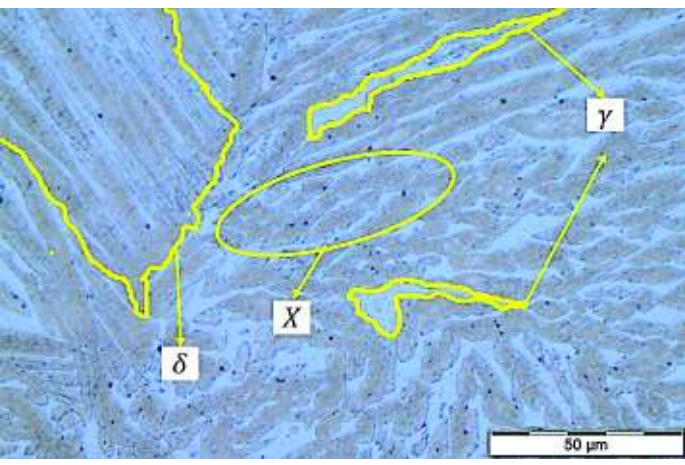
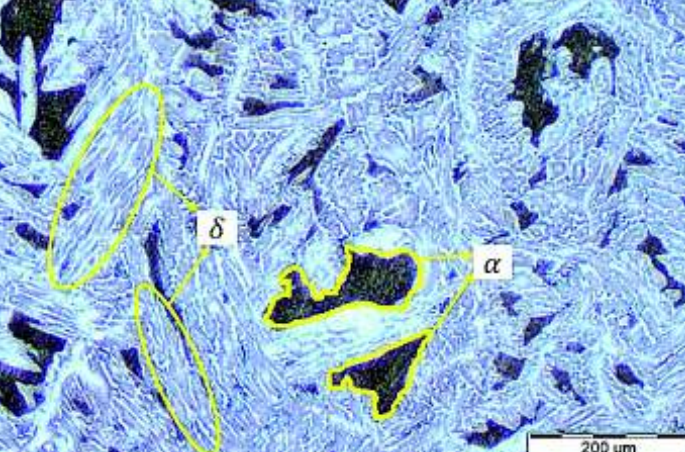


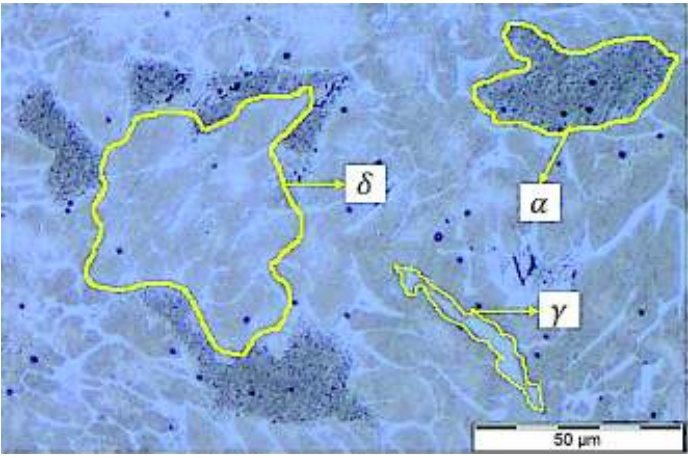
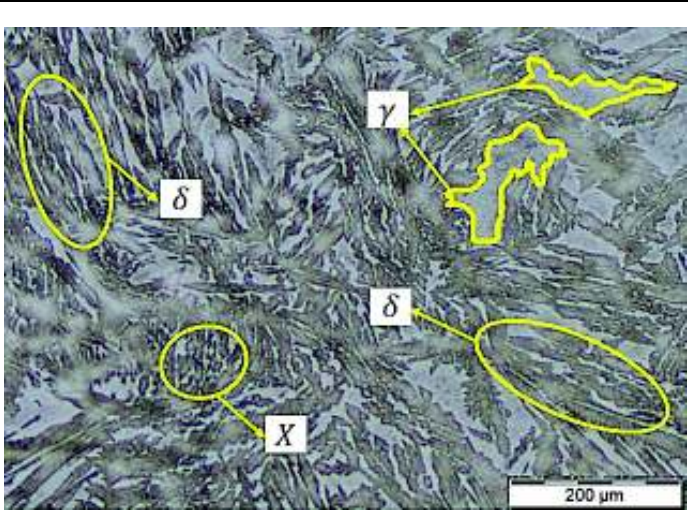
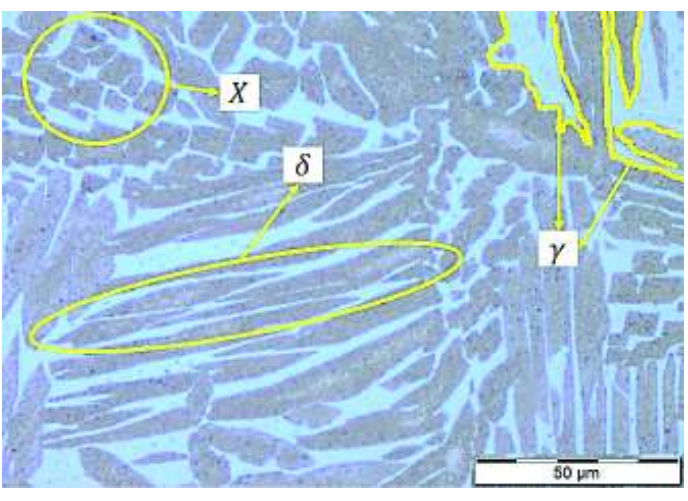
Figura 3.6. Fases microestructurales presentes en la zona afectada por el calor con aumento 500X.

(Fuente: Propia)

En la Tabla 3.5 se muestran las fases microestructurales presentes en el cordón de soldadura en diferentes zonas.

Tabla 3.5. Metalografías del cordón de soldadura en la raíz, centro y cara de la soldadura.

<p>Microestructura de la raíz con aumento 100X</p>	
<p>La fase predominante es la ferrita (α). Se presenta una transformación de ferrita α en ferrita (δ); y se observa la presencia de la fase (X).</p>	<p>Microestructura de la raíz con aumento 100X</p>
<p>Se observa la predominancia de la fase ferrita (δ), la aparición de la fase (X), y austenita (γ).</p>	
<p>Microestructura del centro con aumento 100X</p>	
<p>La fase ferrita (α) se presenta con una transformación en ferrita (δ). La fase austenita se presenta en menores proporciones que la ferrita.</p>	


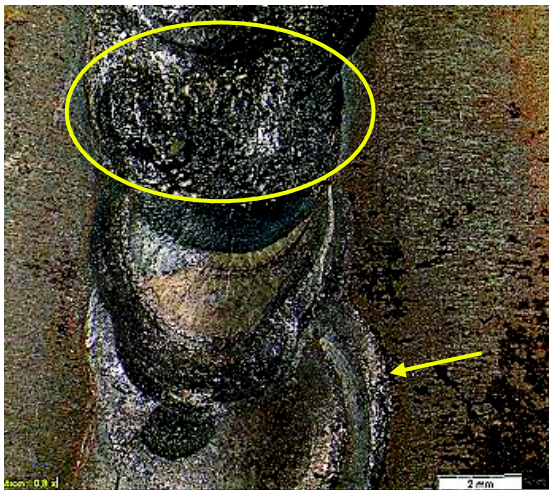


<p>Microestructura del centro con aumento 500X</p>	
<p>La fase austenita (γ) se encuentra en proceso de transformación, mientras que la ferrita casi en su totalidad se ha convertido en ferrita (δ), quedando en menor proporción la fase ferrita (α).</p>	
<p>Microestructura de la cara con aumento 100X</p>	
<p>Se presenta la fase ferrita (δ) con mayor proporción, mientras esta fase se va transformando, la austenita (γ) va aumentando. Debido al aumento de la fase austenita, se observa la presencia de la fase (X).</p>	
<p>Microestructura de la cara con aumento 500X</p>	
<p>Se observa la forma alargada de la ferrita (δ), así como la presencia de la fase austenita (γ) y la fase (X).</p>	



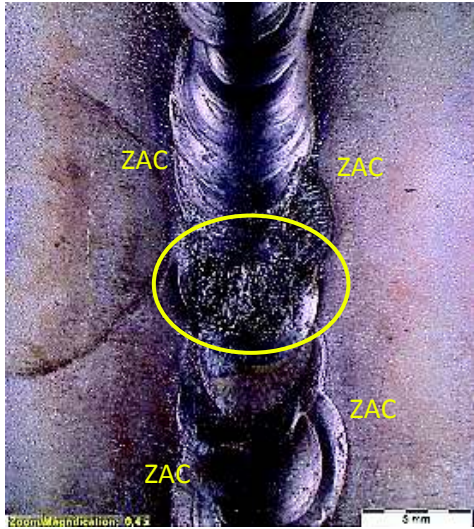
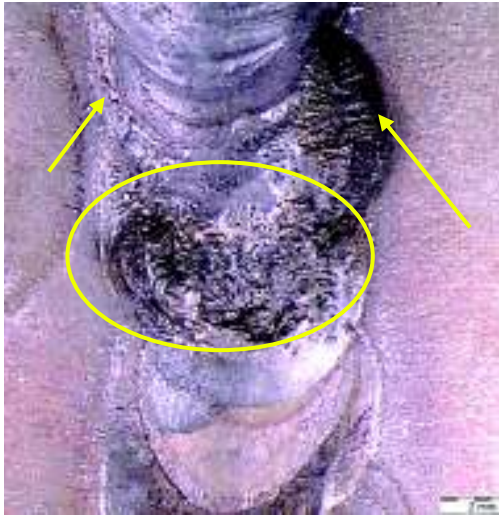
(Fuente: Propia)

3.1.5. Ensayo de corrosión Quito

En la Tabla 3.6 se muestran los resultados que se obtuvieron cada 360 horas hasta un total de 2160 horas del espécimen UIO 1_1 el cual presentó mayor afectación. En el ANEXO V se muestran los resultados de los demás especímenes.

Tabla 3.6. Resultados del ensayo de corrosión Quito.

Probeta ensayada		
Denominación: UIO 1_1	Carga: 2,71 [Nm]	Solución: 5 partes de masa de cloruro de sodio disueltas en 90 partes de agua destilada y 5 partes de cloro líquido.
Tiempo de estudio: 0 horas		Tiempo de estudio: 360 horas
Aumento: 0,63X		Aumento: 0,8X
		
Se observa en la raíz del cordón de soldadura la presencia de una mordedura.		Se observa un ligero aumento en la propagación de la mordedura, así como desprendimiento de material.
Tiempo de estudio: 720 horas		Tiempo de estudio: 1080 horas
Aumento: 1,25X		Aumento: 1X
		
En este punto del estudio se observa que la propagación de la mordedura no es considerable en relación con las mostradas anteriormente.		La discontinuidad mostrada no muestra una propagación significativa.

Tiempo de estudio: 1440 horas	Tiempo de estudio: 1800 horas
Aumento: 1,25X	Aumento: 0,8X
	
No se observa que la mordedura se extienda a lo largo del cordón de soldadura.	Casi al concluir el trabajo, se observa que esta discontinuidad, identificada como mordedura, no resulta ser dañina a la soldadura.
Tiempo de estudio: 2160 horas	
Aumento: 0,4X	Aumento: 0,8X
	
Esta discontinuidad superficial se mantiene constante durante el tiempo de estudio, y de igual manera no se presenta algún cambio significativo en la zona afectada por el calor.	

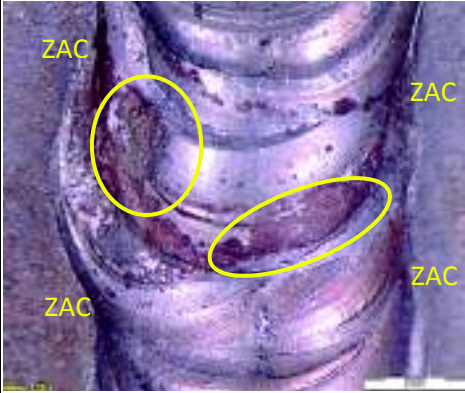
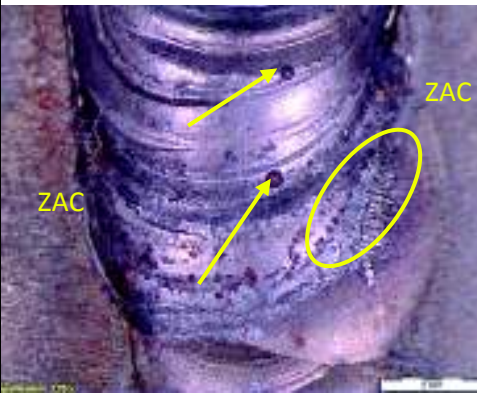
(Fuente: Propia)

3.1.6. Ensayo de corrosión Guayaquil

En la Tabla 3.7 se muestran los resultados que se obtuvieron cada 360 horas hasta un total de 2160 horas del espécimen GYE 2_1 el cual presentó mayor afectación. En el ANEXO V se muestran los resultados de los demás especímenes.

Tabla 3.7. Resultados ensayo de corrosión Guayaquil.

Probeta ensayada		
Denominación: GYE 2_1	Carga: 2,71 [Nm]	Solución: Agua de mar
Tiempo de estudio: 0 horas		Tiempo de estudio: 720 horas
Aumento: 0,8X		Aumento: 0,63X
		
Se observa que el cordón de soldadura no presenta defectos superficiales significativas.		Se observa un desprendimiento de material y un cambio de coloración debido a la capa de óxido.
Tiempo de estudio: 1140 horas		
Aumento: 0,63X		
		
Se observa un cambio de coloración en los bordes del cordón de soldadura (raíz).		

Tiempo de estudio: 2160 horas	
Aumento: 1,25X	Aumento: 1,25X
	
Se observa un cambio de coloración en el cordón de soldadura que genera desprendimiento de material. Además, se observa que no existe una propagación de las porosidades.	

(Fuente: Propia)

3.1.7. Pérdida de masa y deformación durante el ensayo

Los resultados de pérdida de masa de los especímenes UIO 1_1 y GYE 2_1 se encuentran detallados en la Tabla 3.8. En el ANEXO VI se muestran los resultados de los demás especímenes.

Tabla 3.8. Resultados de pérdida de masa de los especímenes expuestos a corrosión.

Denominación: UIO 1_1							
Tiempo de corrosión [horas]	0	360	720	1080	1440	1800	2160
Masa [g]	262,9	262,87	262,85	262,83	262,81	262,75	262,73
Δ Masa [g]	0,17						
Denominación: GYE 2_1							
Tiempo de corrosión [horas]	0	360	720	1080	1440	1800	2160
Masa [g]	246	-	245,94	-	245,91	-	245,87
Δ Masa [g]	0,16						

(Fuente: Propia)

Cuando se realiza este tipo de ensayo, los especímenes tienden a obtener una deformación. En la Figura 3.7 se observa la deformación de los especímenes utilizados en este trabajo al ser sometidos a diferentes cargas.

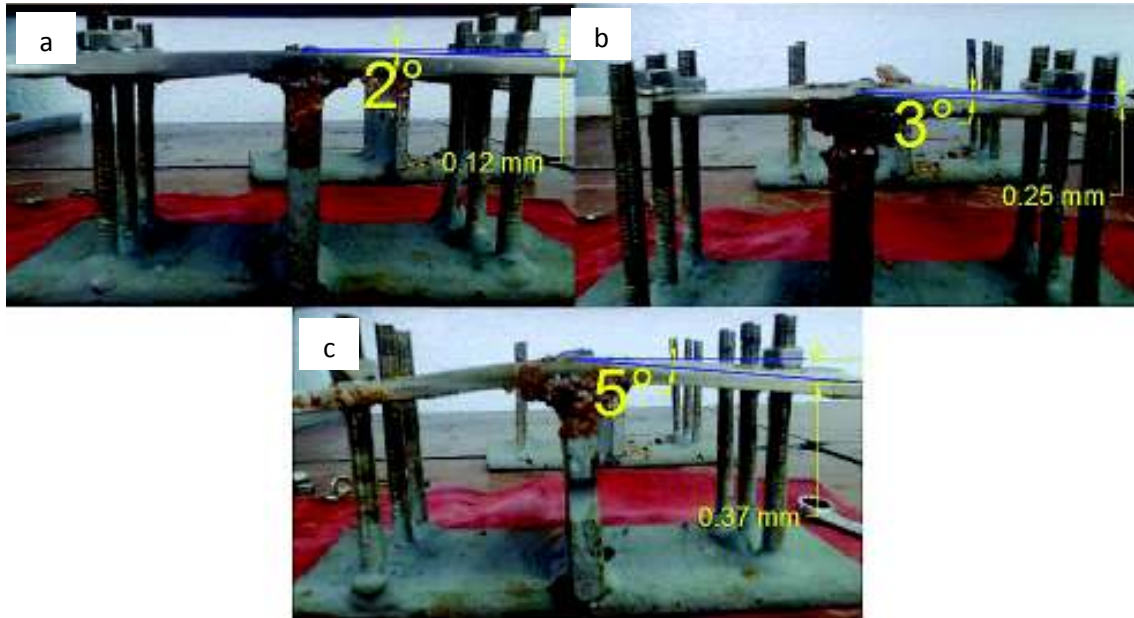


Figura 3.7. Ángulos y altura de deformación de los especímenes aplicado el torque: a) 2,71 Nm, b) 5,42 Nm, c) 8,13 Nm.

(Fuente: Propia)

3.1.8. Metalografías de los especímenes después del ensayo de corrosión.

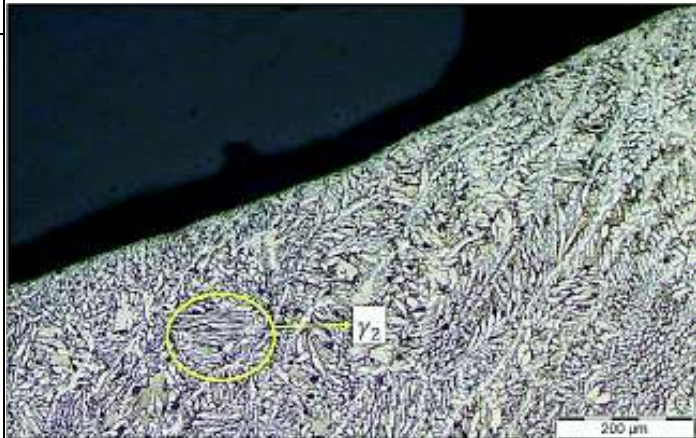
En la Tabla 3.9 se muestran las metalografías del espécimen UIO 1_1. En el ANEXO VII se muestran los resultados de los demás especímenes.

Tabla 3.9. Metalografías del espécimen UIO 1_1.

<p>Microestructura de la zona afectada por el calor y cordón de soldadura en aumento 100X</p>	
<p>En la zona afectada por el calor no se presenta algún cambio microestructural; en el material de aporte se observan las fases ferrita (δ) y austenita (γ).</p>	

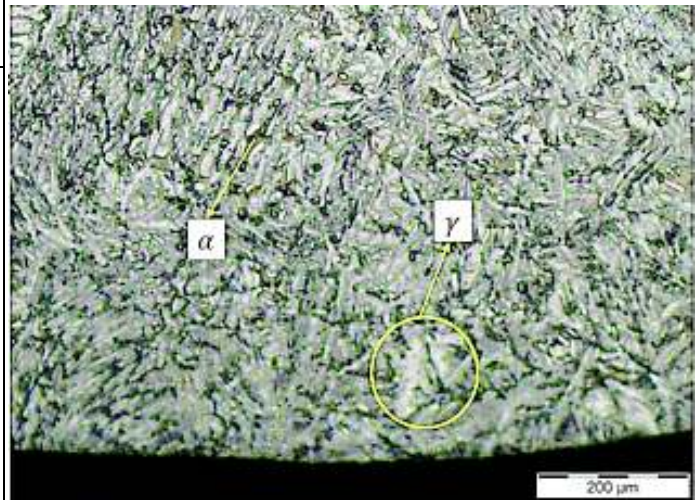
Microestructura del cordón de soldadura (cara) en aumento 100X

Se observa la aparición de la austenita (γ_2), conservando la base ferrítica y en poca proporción, la austenita (γ).



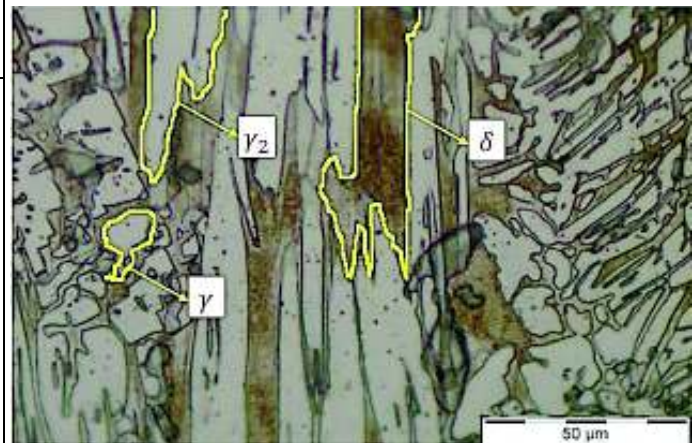
Microestructura del cordón de soldadura (raíz) en aumento 100X

Se presenta las fases ferrita (α) y austenita (γ).



Microestructura del cordón de soldadura (raíz) en aumento 500X

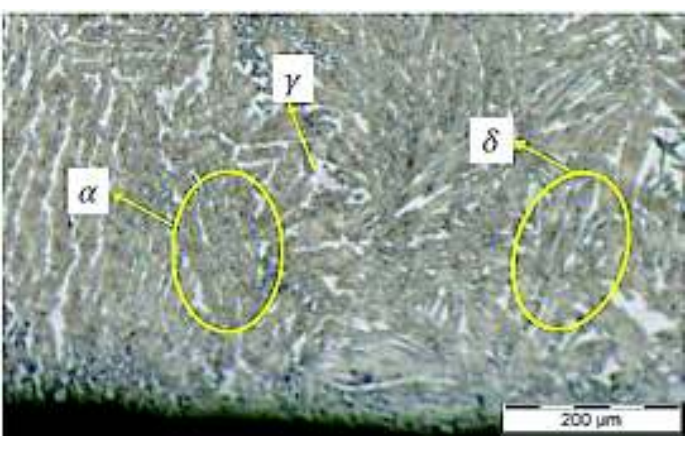
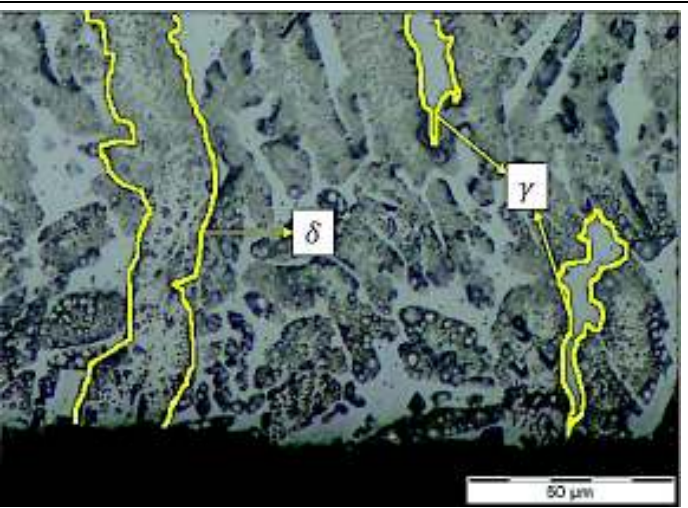
Las fases: ferrita (δ), austenita (γ) y austenita (γ_2).



(Fuente: Propia)

En la Tabla 3.10 se muestran las metalografías del espécimen GYE 1_1.

Tabla 3.10. Metalografías del espécimen GYE 1_1.

<p>Microestructura del cordón de soldadura (raíz) en aumento 100X</p>	
<p>Se presentan las fases ferrita (α) y ferrita (δ), que son las predominantes en comparación con la fase austenítica (γ).</p>	
<p>Microestructura del cordón de soldadura (raíz) en aumento 500X</p>	
<p>Se observa la mayor presencia de ferrita (δ), en relación con la fase austenita (γ).</p>	

(Fuente: Propia)

3.1.9. Velocidad de corrosión

Los resultados de velocidad de corrosión se muestran en la Tabla 3.11, Tabla 3.12 y Tabla 3.13.

Tabla 3.11. Velocidad de corrosión de los especímenes UIO 1_1 Y GYE 2_1 a 720 horas.

Id	Masa inicial [g]	Masa final [g]	Velocidad de corrosión [mm/año]
UIO 1_1	262,9	262,85	$5,94 \times 10^{-3}$
GYE 2_1	246	245,94	$7,13 \times 10^{-3}$

(Fuente: Propia)

Tabla 3.12. Velocidad de corrosión de los especímenes UIO 1_1 Y GYE 2_1 a 1440 horas.

Id	Masa inicial [g]	Masa final [g]	Velocidad de corrosión [mm/año]
UIO 1_1	262,9	262,81	$5,35 \times 10^{-3}$
GYE 2_1	246	245,91	$5,35 \times 10^{-3}$

(Fuente: Propia)

Tabla 3.13. Velocidad de corrosión de los especímenes UIO 1_1 Y GYE 2_1 a 2160 horas.

Id	Masa inicial [g]	Masa final [g]	Velocidad de corrosión [mm/año]
UIO 1_1	262,9	262,73	$6,74 \times 10^{-3}$
GYE 2_1	246	245,87	$5,15 \times 10^{-3}$

(Fuente: Propia)

3.1.10. Ensayo de micro-dureza

En la Figura 3.8 se muestra la distribución de los puntos de indentación usados para el ensayo de micro-dureza.

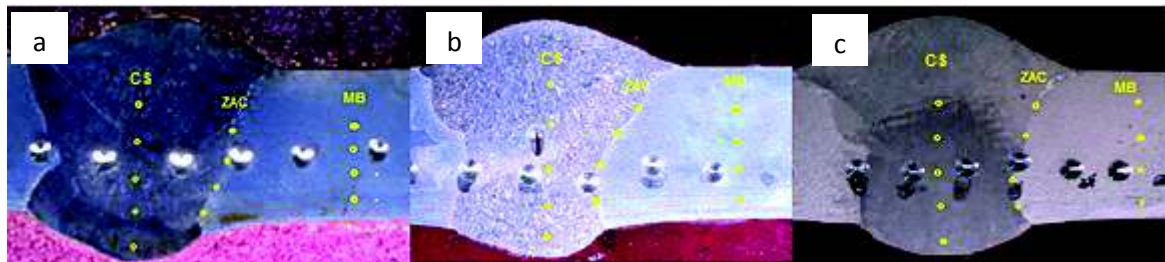


Figura 3.8. Barrido de micro-durezas: a) probeta testigo, b) probeta UIO 1_1, c) probeta GYE 2_1.

(Fuente: Propia)

Tabla 3.14. Valores de micro-dureza probeta testigo.

Probeta testigo					
MB		ZAC		CS	
HRC	HV	HRC	HV	HRC	HV
23	250,10	21	241,66	26	267,17
22	246,86	24	257,53	26	269,49
23	253,11	22	243,46	24	259,17
22	246,91	24	255,81	27	272,28
				26	267,28
Promedio:					
22,50	249,25	22,75	249,62	25,80	267,08

(Fuente: Propia)

Tabla 3.15. Valores de micro-dureza probeta UIO 1_1.

UIO 1_1					
MB		ZAC		CS	
HRC	HV	HRC	HV	HRC	HV
22	243,16	22	245,99	27	278,27
23	249,64	21	240,25	26	267,51
21	241,73	23	249,73	27	274,26
26	271,78	23	253,76	24	259,40
				23	251,04
Promedio:					
23	251,58	22,25	247,43	25,40	266,10

(Fuente: Propia)

Tabla 3.16. Valores de micro-dureza probeta GYE 2_1.

GYE 2_1					
MB		ZAC		CS	
HRC	HV	HRC	HV	HRC	HV
21	242,15	27	274,16	26	266,95
25	263,20	24	259,49	26	266,25
24	259,66	26	270,62	25	265,88
27	278,24	25	264,06	26	267,02
				25	265,37
Promedio:					
24,25	260,81	25,50	267,08	25,60	266,29

(Fuente: Propia)

En la Tabla 3.14, Tabla 3.15 y Tabla 3.16 se muestran los valores de micro-dureza para la probeta testigo, UIO 1_1 y GYE 2_1, respectivamente.

3.1.11. Ensayo de dureza

En la Figura 3.9 se muestra la distribución de los puntos de indentación usados para el ensayo de dureza.

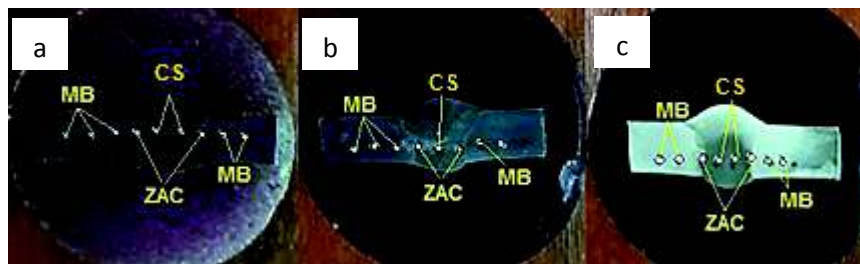


Figura 3.9. Barrido de durezas: a) probeta testigo, b) probeta UIO 1_1, c) probeta GYE 2_1.

(Fuente: Propia)

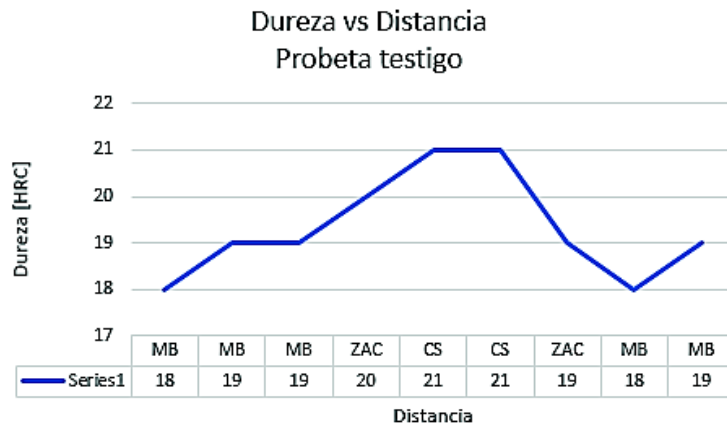


Figura 3.10. Dureza vs Distancia para la probeta testigo.
(Fuente: Propia)

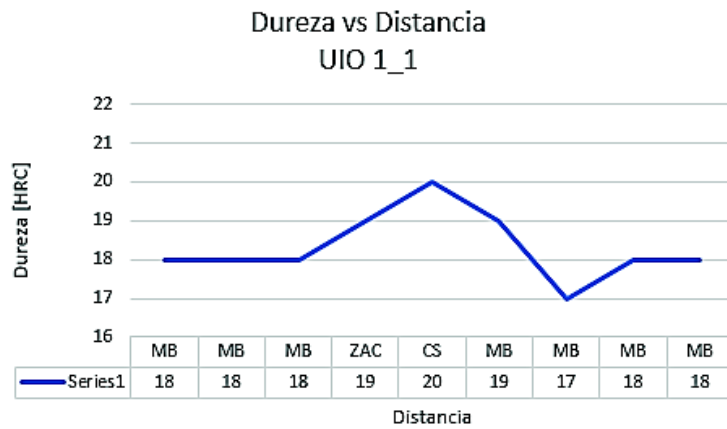


Figura 3.11. Dureza vs Distancia para la probeta UIO 1_1.
(Fuente: Propia)

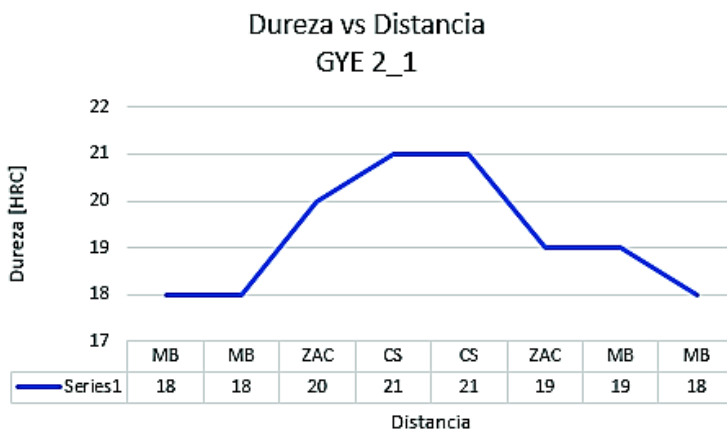


Figura 3.12. Dureza vs Distancia para la probeta GYE 2_1.
(Fuente: Propia)

3.2. Discusión

De los resultados mostrados, se realiza el análisis de cada punto mencionado, con el fin de determinar la presencia de afectaciones que pueden dañar el material.

3.2.1. Proceso de soldadura

En la Tabla 3.17 se muestra los valores de los parámetros utilizados en el proceso de soldadura con el material de aporte ER-2594.

Tabla 3.17. Resultados del proceso de soldadura con el material de aporte ER-2594.

N° Pase	Corriente	Voltaje	Velocidad de avance	Calor de entrada
	Amperios	Voltios	mm/min	KJ/mm
1	73	10	21,57	2,03
2	94	10	22,41	2,52
3	99	10	23,25	2,55
4	94	10	24,09	2,34

(Fuente: Propia)

El calor de entrada para el presente estudio está en el rango de 2,03 – 2,55 KJ/mm, esto bajo los parámetros de soldadura mostrados en la Tabla 3.17. (Miguel & Basco, 2011) expresan que el calor de entrada para el proceso de soldadura GTAW (TIG) recomendado en aceros Dúplex 2205 no debe exceder 2,5 KJ/mm, teniendo en cuenta que así no se obtendrán afectaciones negativas tanto en la microestructura como en las propiedades del material. El presente trabajo cumple con el valor recomendado, lo que implica que no existirán afectaciones considerables como cambios en la microestructura, formaciones de fases secundarias, oxidación, corrosión, que se analizarán con mayor profundidad en los puntos siguientes.

3.2.2. Ensayo de doblado guiado

Las probetas sometidas al ensayo de doblez de cara y de raíz no presentan ningún tipo de discontinuidad, es por esto, que se acepta la soldadura, guiándose en lo establecido en el Código ASME Sección IX subsección QW-163. En la subsección mencionada, se establece que para aceptar una soldadura los defectos abiertos en la misma o en la zona afectada por el calor (ZAC), no deben exceder 3.17 mm (1,8 pulgadas). A continuación, en la Tabla 3.18 se muestran los especímenes sin discontinuidades.

Tabla 3.18. Especímenes sometidos al ensayo de doblado guiado.

Doblado de cara	Doblado de raíz
	
No presenta discontinuidades	No presenta discontinuidades

(Fuente: Propia)

3.2.3. Ensayo de tracción

En la Tabla 3.19 se muestran los valores de resistencia a la tracción que brinda: la Norma ASTM A182/182M-18, lo obtenido en este trabajo y varios autores.

Tabla 3.19. Valores de resistencia a la tracción.

Id	Resistencia a la tracción		Fuente
	MPa	Ksi	
F 51/S31803	620 mín.	90 mín.	ASTM A182/182M-18
Metal base	778,83	112,96	Bastidas & Pila, 2018
T-1	808,70	117,30	Propia
T-2	749,30	108,70	Propia
S31803	720 – 950	104,43 – 137,79	ACERINOX, 2013
S31803	680 – 880	98,63 – 127,63	Lázaro, 2012
S31803	700 - 900	101,53 – 130,53	Alloy wire international, 2018

(Fuente: ASTM A182/A182M-18, 2017; Bastidas & Pila, 2018; Propia, ACERINOX, 2013, Lázaro, 2012; Alloy wire international, 2018)

Los valores de resistencia a la tracción tanto para el presente trabajo como para los demás trabajos están por encima de 620 MPa, que es el valor mínimo establecido por la Norma ASTM A182/182M-18.

El material base utilizado en este estudio fue tratado térmicamente con un recocido a una temperatura de 1065,56 °C (1950 °F), y enfriado en agua por debajo de los 426,67 °C (800 °F), en un intervalo de tiempo de 0 a 3 minutos. Dando como resultado una resistencia a la tracción de 800 MPa (116000 psi) como se muestra en la hoja de vida que tiene el material

(ANEXO VII). Además, el material base fue laminado, esto con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas.

Este laminado y tratamiento térmico conlleva a obtener los siguientes cambios:

- El valor de resistencia a la tracción del material base en relación con el valor dado por la Norma ASTM A182/182M-18, tiene un incremento del 25,51%; para el espécimen T-1 un incremento del 30,30%; para T-2 un incremento del 20,80%.
- El valor de resistencia a la tracción del material base en relación con el valor mostrado en la hoja de vida del material, tiene un incremento del 2,64%; para el espécimen T-1 un incremento del 1,08%; para T-2 un incremento del 6,33%.

Estos incrementos en la resistencia a la tracción también se observan en los trabajos presentados por otros autores, quienes evalúan el acero Dúplex 2205 laminado y tratado térmicamente obteniendo valores como los mostrados en la Tabla 3.19, esto permite determinar que el acero Dúplex de este trabajo es laminado y tratado térmicamente.

Del ensayo de tracción se obtiene que la zona de fractura en el espécimen T-1 se presenta en el metal base y en el espécimen T-2 se presenta en el cordón de soldadura debido a la presencia de porosidades generadas durante el proceso de soldadura. Los valores de resistencia obtenidos deben cumplir con los criterios de aceptación según el Código ASME SECCION IX subsección QW-153.1.

(a) La mínima resistencia de tensión especificada del metal base.

Valor proporcionado por la Norma ASTM A182/182M-18: 620 MPa.

Valores de resistencia a la tracción: T-1 = 808,70 MPa, T-2 = 749,30 MPa.

Los valores de T-1 y T-2 son mayores a los proporcionados por la norma, por lo tanto, cumplen con este criterio.

(b) La mínima resistencia de tensión del más débil de los dos, debe sobrepasar el valor mínimo establecido.

El valor de T-2 = 749,30 MPa es mayor al valor proporcionado por la norma, por lo tanto, cumplen con este criterio.

(c) La mínima resistencia de tensión especificada del metal de soldadura cuando la sección sea aplicable, da disposiciones para el uso de metal de soldadura que tiene resistencia a temperatura ambiente inferior que el metal base

Valores de resistencia a la tracción: T-1 = 808,70 MPa, la rotura se presenta en el material base, y para T-2 = 749,30 MPa, la rotura se presenta en el cordón de soldadura debido a la presencia de porosidades. Por lo tanto, solo cumple para T-1.

- (d) Si el espécimen se rompe en el metal base fuera de la soldadura o de la línea de fusión, la prueba será aceptada como que satisface los requerimientos siempre y cuando la resistencia no esté más del 5% debajo de la mínima resistencia de tensión especificada del metal base.

El valor de T-1: 808,70 MPa es superior al valor proporcionado por la norma, por lo tanto, cumplen con este criterio.

Entonces por lo anterior se obtiene que el ensayo de tracción cumple con la mayoría de los requisitos de aprobación, dando la aceptación de éste.

3.2.4. Metalografías metal base, zona afectada por el calor y cordón de soldadura

El acero Dúplex 2205 utilizado en este trabajo, posee una microestructura de ferrita y austenita en igualdad de proporciones, característica principal de esta clase de aceros, dichas fases microestructurales están orientadas en la dirección de laminación; además se observa un cambio en la forma de grano, conservando la distribución de las fases ferrita y austenita. En la Figura 3.13 se muestra la metalografía del acero Dúplex 2205 en su estado en bruto de colada, y laminado.

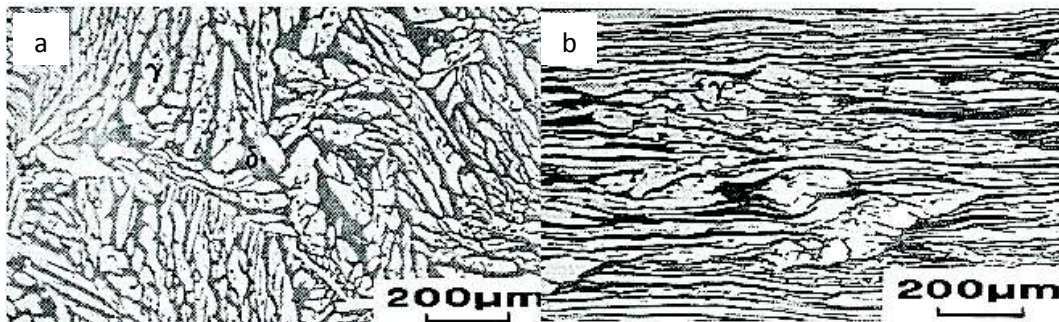


Figura 3.13. Distribución de las fases ferrita y austenita en el acero Dúplex 2205: a) acero en bruto, b) acero laminado.

(Fuente: Iza-Mendia, Pinol-Juez, & Gutierrez, 1998)

En la Figura 3.14 a) y b), se muestran las metalografías obtenidas en este trabajo; en la Figura 3.14 c) y d), las metalografías presentadas por (Bruno & Martins das Neves, 2016) y (Amaury, 2006), respectivamente. Donde se indica el acero Dúplex 2205 laminado, que al comparar con las metalografías de este estudio presenta formar similar, concluyendo que el material está laminado.

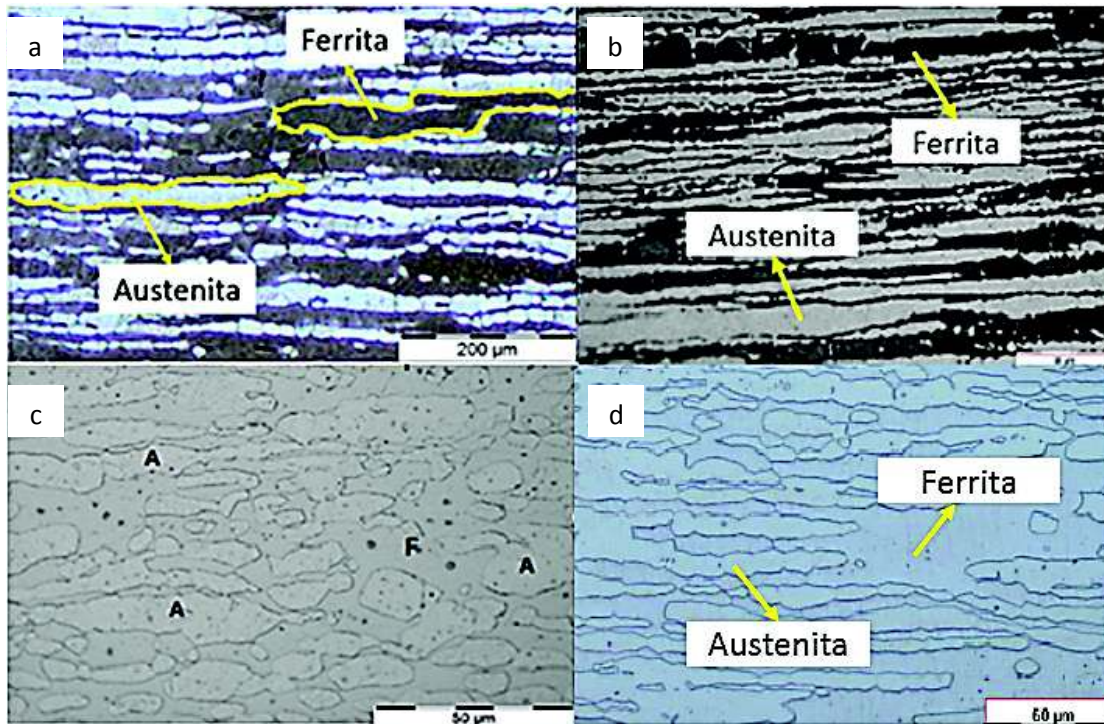


Figura 3.14. Metalografías del acero Dúplex 2205 laminado: a) y c) Presente trabajo; b) Bruno & Martins das Neves; d) Amaury.

(Fuente: Propia; Bruno & Martins das Neves, 2016; Amaury, 2006)

En la zona afectada por el calor mostrada en la Figura 3.15 se observa un cambio en la distribución de fases, obteniendo la presencia de las fases secundarias como: ferrita (α), austenita (γ), austenita secundaria (γ_2), fase (σ), fase (X).

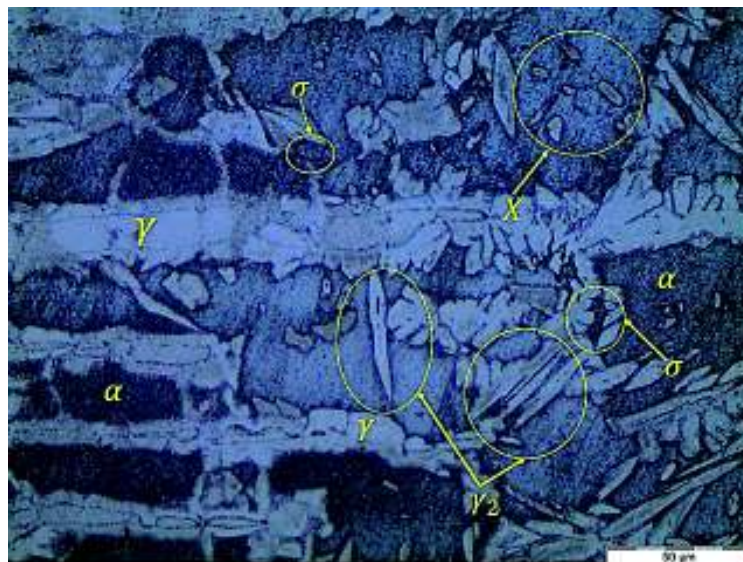


Figura 3.15. Fases secundarias presentes en la zona afectada por el calor.

(Fuente: Propia)

Se puede observar la predominancia de la fase ferrítica, con una distribución disímil a la presentada en el material base. Debido a que durante el proceso de soldadura se alcanzan elevadas temperaturas, se presentan las fases secundarias.

La fase austenita secundaria (γ_2) presente en la zona afectada por el calor, se genera cuando existe una temperatura superior a 650 °C como indica (Medina, Rodríguez, & Stella, 2011); se presenta en forma de ramificaciones derivadas de la fase austenítica; esta fase no resulta perjudicial para la presencia de corrosión ya que es una transformación propia de la austenita principal.

En el rango de temperaturas entre: 550 °C – 900 °C, se presenta la fase σ , esto debido a la transformación de la fase ferrítica; se localiza en las interfases de ferrita/austenita, pero con tendencia hacia los granos de ferrita. La presencia de esta fase empobrece a la fase ferrita de elementos estabilizadores como cromo, wolframio y molibdeno, resultando en la desestabilización para su respectiva transformación (Fargas, Anglada, & Mateo, 2002). Esta fase no resulta perjudicial para la generación de corrosión bajo las condiciones de trabajo de este estudio.

Como se observa la presencia de la fase (σ), esto quiere decir que necesariamente debe presentarse la fase (X), ya que la fase sigma se deriva de la fase (X), llegando a descomponerse después de largos tiempos de exposición. Según (Giraldo & Duarte, 2007), esta fase se precipita en un rango de temperatura entre 700 °C y 900 °C. Además, se presenta en menor cantidad que la fase (σ). Gracias a las temperaturas altas de trabajo que alcanzan el rango de temperatura establecido, se forma esta fase. En este estudio bajo las condiciones de trabajo expuestas, esta fase no presenta alguna afectación o generación de corrosión al material.

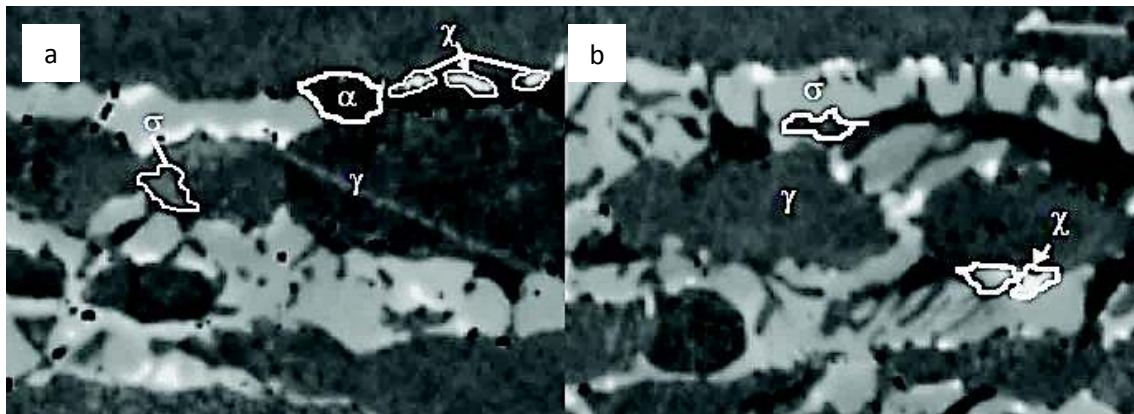
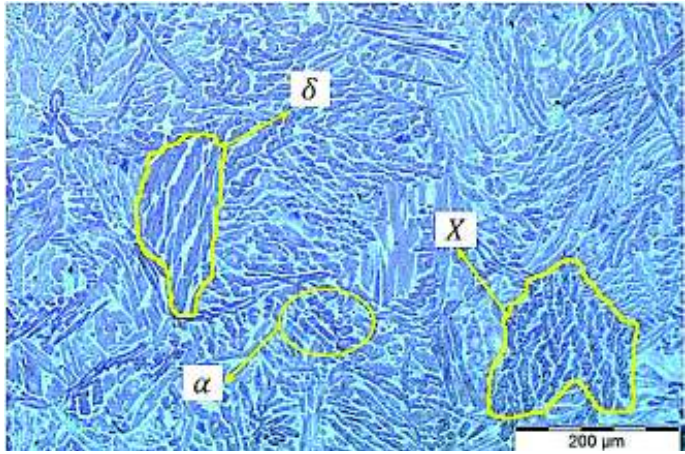
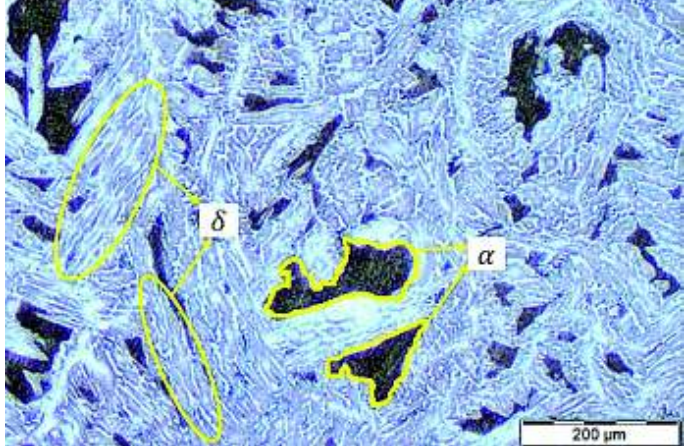
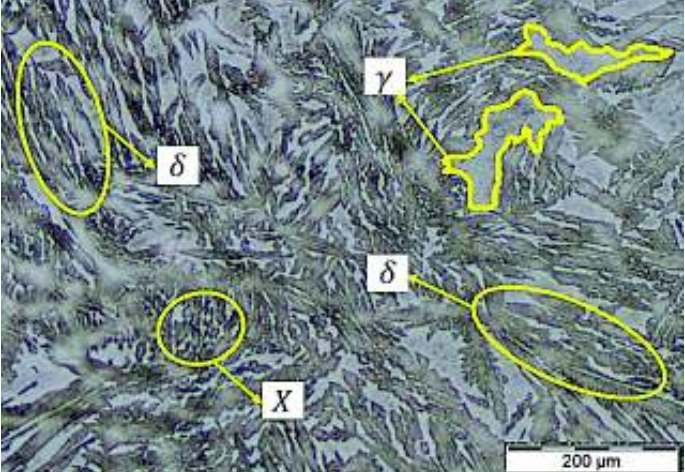


Figura 3.16. Micrografías de los aceros tratados térmicamente a 850 °C durante 35 minutos: a) UNS S32750, b) UNS S32760.

(Fuente: Giraldo & Duarte, 2007)

En la Figura 3.16 se muestra la forma que presentan las fases secundarias, esto según (Giraldo & Duarte, 2007); al compararlas con el presente trabajo, se puede observar la similitud de dichas fases secundarias.

Tabla 3.20. Metalografías del cordón de soldadura: raíz, centro y cara en aumento de 100X.

<p>Metalografía del cordón de soldadura (raíz)</p>	
<p>La ferrita (δ) en la zona señalada es aquella que se presenta de forma alargada y coloración más oscura. La ferrita (α) en la zona señalada se presenta en forma de granos equiaxiales. La fase (X) en la zona señalada se presenta en forma de granos agrupados diferentes a la forma de la ferrita (δ) y ferrita (α). La zona más clara es la fase austenita.</p>	<p>Metalografía del cordón de soldadura (centro)</p>
<p>La ferrita (δ) en la zona señalada es aquella que se presenta de forma alargada y coloración más oscura. La ferrita (α) en la zona señalada se presenta en forma de granos equiaxiales. La zona más clara es la fase austenita.</p>	
<p>Metalografía del cordón de soldadura (cara)</p> <p>La ferrita (δ) en la zona señalada es aquella que se presenta de forma alargada y coloración más oscura. La fase (X) en la zona señalada se presenta en forma de granos agrupados diferentes a la forma de la ferrita (δ) y ferrita (α). La zona más clara es la fase austenita.</p>	

(Fuente: Propia)

Las figuras mostradas en la Tabla 3.20 indican que la fase predominante es la fase ferrítica (δ), en relación con la fase austenítica (γ), que se presenta en menores proporciones. La ferrita se presenta de forma alargada denominada ferrita (δ). En la Figura 3.17 se muestra las metalografías de autores como (Pramanik, Littlefair, & Basak, 2015), que indica que la forma de la ferrita (δ) se presenta de forma alargada, típica forma que presentan los materiales fundidos, de igual manera, (Aboufazi & Iman, 2015), presenta la ferrita de la forma mencionada en soldadura GTAW de aceros Dúplex 2205. Estas metalografías del material aporte mostradas por los autores ya mencionados guardan concordancia y relación con las metalografías del material de aporte obtenidas en este trabajo.

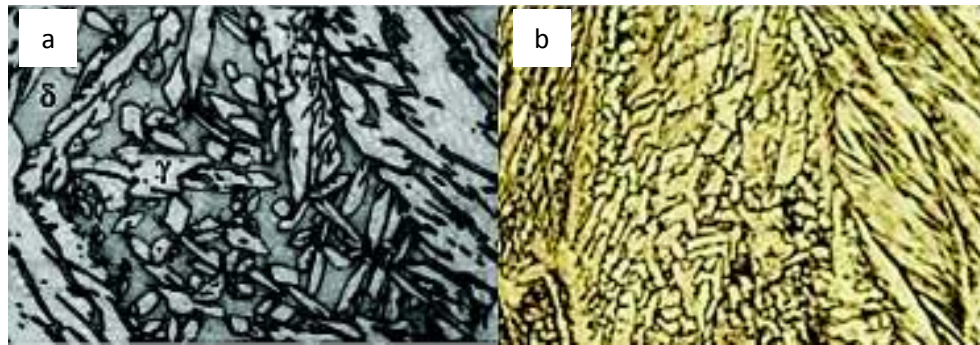


Figura 3.17. Metalografías de la soldadura de un acero Dúplex 2205, forma de la ferrita; a) aumento 500X, b) aumento 100X.

(Fuente: Pramanik, Littlefair, & Basak, 2015; Aboufazi & Iman, 2015)

El diagrama de Shaffer/Delong nos proporciona una estimación del porcentaje de cada fase. Para lo cual se necesita el cálculo del cromo equivalente como señala la Ecuación 3.2, y el níquel equivalente como se indica en la Ecuación 3.3. Esto tanto para el material base como para el material de aporte.

$$\text{Cromo equivalente} = \% \text{ Cr} + \% \text{ Mo} + 1,5\% \text{ Si} + 0,5\% \text{ Nb}$$

Ecuación 3.2. Cálculo del cromo equivalente.

(Fuente: Ospina, Aguirre, & Parra, 2007)

$$\text{Níquel equivalente} = \% \text{ Ni} + 30\% \text{ C} + 0,5\% \text{ Mn}$$

Ecuación 3.3. Cálculo de níquel equivalente.

(Fuente: Ospina, Aguirre, & Parra, 2007)

El porcentaje de cromo equivalente para el material base calculado es de: 26,50% y el porcentaje de níquel equivalente calculado es de: 6,5%. El porcentaje de cromo equivalente para el material de aporte ER-2594 calculado es de: 28,85% y el porcentaje de níquel equivalente calculado es de: 9,6%. El detalle de cálculo se encuentra en el ANEXO IX.

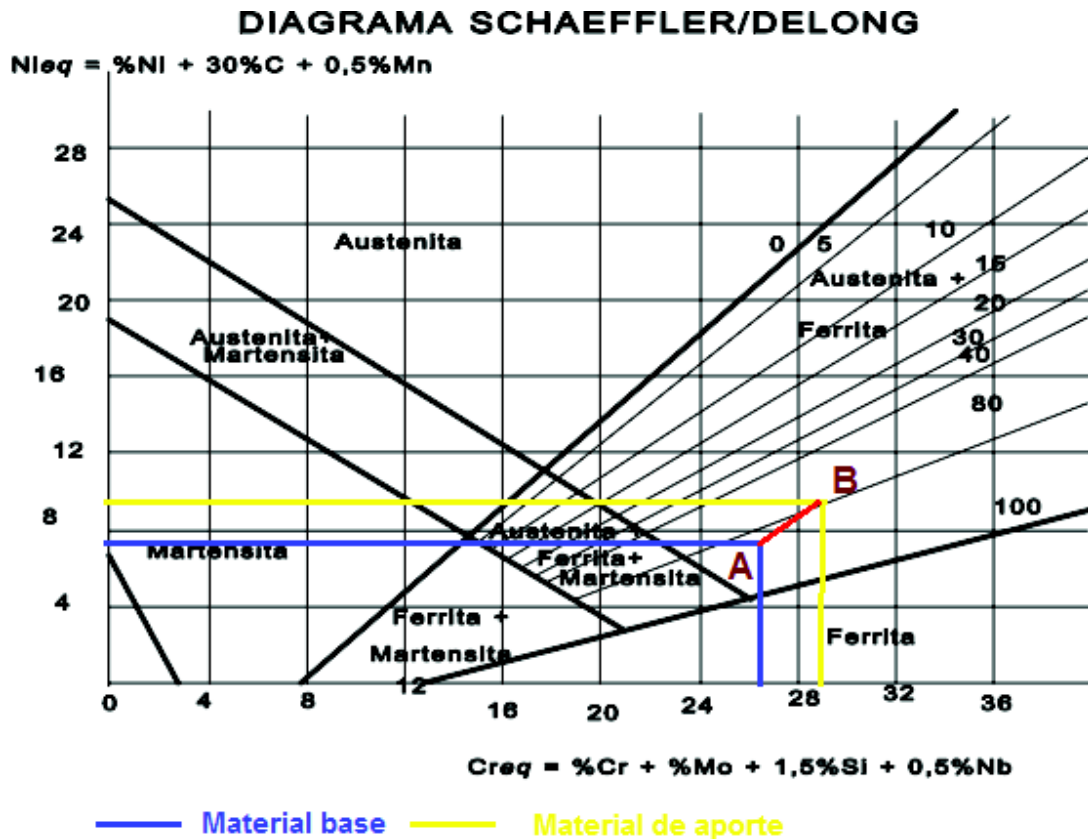


Figura 3.18. Diagrama de Schaeffler/Delong aplicado al material base y al material de aporte ER-2594.

(Fuente: Propia)

Del diagrama de Schaeffler/Delong (Figura 3.18) con los datos obtenidos (recta AB), ubicamos que la junta soldada tiene mayor cantidad de ferrita, con respecto a la austenita, como se indica en las metalografías de la Tabla 3.21, esto en base a la composición química tanto del metal base como del cordón de soldadura.

3.2.5. Ensayo de corrosión bajo esfuerzos

Para el estudio del ensayo de corrosión se utiliza condiciones de trabajo ya establecidas, las cuales servirán para los puntos siguientes. Las condiciones de trabajo a las que estuvieron expuestos los especímenes son: temperaturas entre 28°C – 30°C, 0,1% de límite elástico del material (ANEXO X), y sumergidos en dos tipos de composiciones, tanto para Quito y Guayaquil. La composición para el ensayo de corrosión en Quito fue salina, constituida de 5 partes en masa de cloruro de sodio disueltas en 90 partes de agua destilada y 5 partes de cloro líquido. La composición utilizada para el ensayo de corrosión en Guayaquil es agua de mar.

Para la generación de corrosión bajo esfuerzos las condiciones de trabajo a las cuales el material debe ser expuesto son altas temperaturas y elevados esfuerzos. Las altas temperaturas según (Milad, 2012) indica que deben exceder los 100 °C, y el esfuerzo que se debe aplicar al material debe ser como mínimo el 0,9% del límite elástico que posee el material; (Battacharya, 2008) señala que la temperatura de trabajo para evaluar la corrosión bajo esfuerzos debe estar entre un rango de 100 °C – 200°C. Considerando que la composición utilizada para evaluar los especímenes fue similar (NaCl).

Por lo tanto, evaluando las condiciones de trabajo tanto para el presente estudio como para los trabajos mencionados, existe una diferencia que implica la no presencia de este tipo de corrosión en el tiempo de estudio. La diferencia radica en que la temperatura máxima utilizada en el presente trabajo es 30°C, y la temperatura mínima para evaluar este tipo de corrosión es 100°C; la carga aplicada para la evaluación en este estudio es 0,1% del límite elástico del material, y al menos se debe tener una carga de 0,9% del límite elástico del material para evaluar este tipo de corrosión.

Además, como se observa en la subsección 3.1.8 en las metalografías obtenidas de las zonas más representativas después del ensayo de corrosión, durante el tiempo de estudio y bajo las condiciones ya mencionadas no se observa afectaciones significativas en la microestructura de dichas zonas, que indiquen la presencia de corrosión bajo esfuerzos.

3.2.6. Análisis de corrosión

Se analiza si existe la presencia de otros tipos de corrosión que se pueden generar tomando en cuenta las condiciones de trabajo del presente estudio y las condiciones que deberían suscitarse para la presencia o no de corrosión en los especímenes analizados.

Bajo las condiciones de trabajo establecidas para el presente estudio, se analiza la presencia de corrosión intercrystalina, teniendo en cuenta que según (Hilti Corporation, 2015), para que exista este tipo de corrosión, las temperaturas de trabajo a las que se debe someter el material deben estar entre 500 °C – 800 °C. Al realizar la comparación de las condiciones de trabajo con el presente estudio, existe una diferencia en el rango de temperaturas utilizadas ya que la temperatura máxima utilizada en el presente estudio es de 30 °C, y para la presencia de este tipo de corrosión se debe someter al material a una temperatura mínima de 500°C, lo que indica que no existe corrosión intercrystalina durante el tiempo de estudio. En la subsección 3.1.8 se observa en las metalografías obtenidas la no presencia de afectaciones significativas que generen este tipo de corrosión.

La corrosión por picaduras se presenta en ambientes altamente corrosivos, y condiciones de trabajo como temperatura y esfuerzos elevados. (Amaury, 2006) indica condiciones de trabajo para la evaluación de corrosión por picaduras, utilizando un medio que simula agua de mar, preparado con agua destilada al 3% en peso de NaCl. Esta solución se preparó con 30,928 g de NaCl cada 1 litro de agua destilada. La temperatura dentro de un rango de 30 °C – 80 °C. Bajo estas condiciones existe la presencia de corrosión por picaduras.

Por las condiciones ya presentadas para el presente trabajo se observa que existe una diferencia, la cual está en la composición utilizada, ya que para el presente trabajo se utilizó el 5% en peso de NaCl, y temperaturas en el rango de 28°C - 30°C, lo que indica que no existe la presencia de este tipo de corrosión en el tiempo de estudio debido a la diferencia presentada en las condiciones de trabajo. En la subsección 3.1.8 se observa en las metalografías obtenidas la no presencia de afectaciones significativas que generen este tipo de corrosión.

Además, con el cálculo del índice de picaduras (PREN), se puede observar que dicho valor se encuentra dentro del rango establecido para este tipo de material en base a la Ecuación 3.4.

$$\text{PREN} = \% \text{Cr} + 3,3 \cdot \% \text{Mo} + 16 \cdot \% \text{N}$$

Ecuación 3.4. Cálculo del PREN

(Fuente: Lázaro, 2012)

El PREN según (Uhlig, 2011) indica que para aceros Dúplex su valor está en el rango de 30 a 40 y para la serie S31803 el valor es de 34; el PREN obtenido para este material es de 34,14 (ANEXO XI), lo cual indica que el material cumple con los valores de resistencia a la corrosión por picaduras establecidos.

La corrosión generalizada se puede presentar debido a la rotura de la capa de pasivación, la cual sirve de protección para los aceros inoxidable. Para la rotura de esta capa de pasivación se deben presentar temperaturas por encima de los 100°C y factores como la poca presencia de oxígeno, compuestos agresivos como ácidos y cáusticos. La capa de pasivación es rica en óxido crómico (Cr_2O_3), lo que permite generar una protección en el material, y a su vez la regeneración de esta capa; al tener ambientes salinos se tiene la presencia de cloro, el cuál es dañino para esta capa de pasivación, interviniendo en la formación de la capa de óxido mencionada. (Hsieh, y otros, 2012)

En el presente trabajo se puede observar en la subsección 2.1.2 la composición química entre el material base y el material de aporte utilizado, teniendo así la presencia de mayor cantidad de cromo en el material de aporte que en el material base, teniendo entre 21% – 23% para el material base y 24,6% de cromo para el material de aporte. Gracias a esto y a las condiciones de trabajo establecidas para el presente trabajo, no existe la rotura ni daño en la capa de pasivación para este acero Dúplex 2205, permitiendo así la resistencia a la corrosión.

3.2.7. Análisis de la pérdida de masa

Para el análisis de cambio de masa, se tomaron los especímenes a los que se aplica el menor torque, tanto para el ensayo de corrosión realizado en Quito como para el realizado en Guayaquil.

En la Figura 3.19 se muestra la gráfica masa vs tiempo para el ensayo de corrosión realizado en Quito; en la Figura 3.20 se muestra la gráfica masa vs tiempo para el ensayo de corrosión realizado en Guayaquil.

Estas gráficas muestran un decrecimiento, tomando en cuenta que se evalúa a partir de las condiciones iniciales de masa hasta la obtención de la masa final después del ensayo de corrosión. La variación de pérdida de masa para el espécimen UIO 1_1 es de 0,17 gramos y del espécimen GYE 2_1 es de 0,16 gramos.

El decrecimiento en la masa del material en función del tiempo puede producirse debido a la limpieza realizada para eliminar la capa de óxido protectora (Cr_2O_3) generada sobre los especímenes; además, se debe a pequeñas discontinuidades en la zona de soldadura que son irrelevantes en este decrecimiento de la masa.

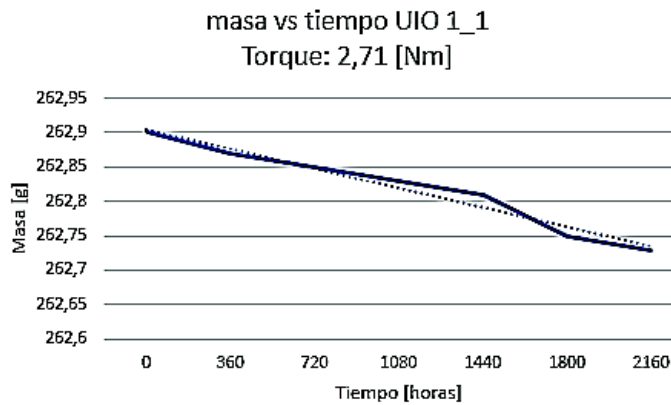


Figura 3.19. Variación de masa vs tiempo para UIO 1_1.

(Fuente: Propia)

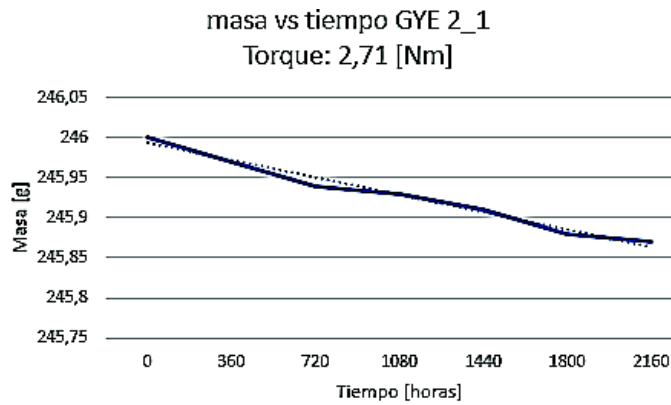


Figura 3.20. Variación de masa vs tiempo para GYE 2_1.
(Fuente: Propia)

La velocidad de corrosión vs tiempo mostrada en la Figura 3.21, es un parámetro que depende de la pérdida de masa. Para el espécimen UIO 1_1 en el tiempo de 0 a 720 horas presenta un incremento en la velocidad de corrosión desde 0 mm/año hasta 0,006 mm/año, esto debido a la primera interacción existente entre el espécimen y el ambiente salino; de 720 a 1440 horas se presenta una disminución en la velocidad de corrosión de 0,006 mm/año a 0,0055 mm/año, esto debido a la limpieza realizada de los especímenes; de 1440 a 2160 horas se presenta un crecimiento de 0,0055 mm/año a 0,0065 mm/año.

Para el espécimen GYE 2_1 en el tiempo de 0 a 720 horas presenta un incremento en la velocidad de corrosión desde 0 mm/año hasta 0,007 mm/año, esto debido a la primera interacción existente entre el espécimen y el agua de mar; de 720 a 1440 horas se presenta una disminución en la velocidad de corrosión de 0,007 mm/año a 0,0055 mm/año, esto debido a la limpieza realizada de los especímenes; de 1440 a 2160 horas se presenta un decrecimiento de 0,0055 mm/año a 0,0053 mm/año.

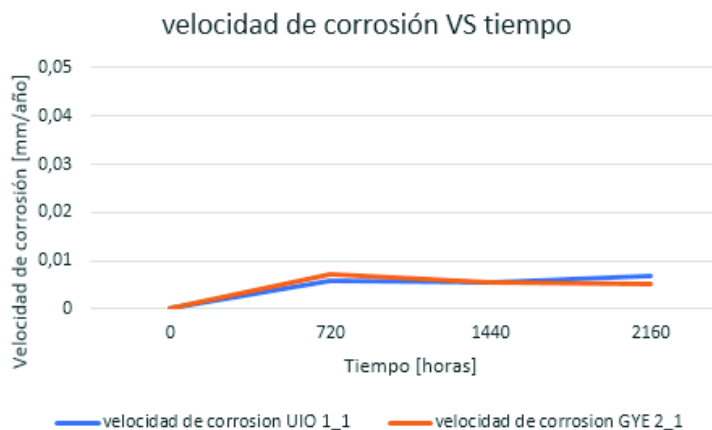


Figura 3.21. Velocidad de corrosión vs tiempo, para los especímenes UIO 1_1 y GYE 2_1.
(Fuente: Propia)

De lo anterior, la velocidad de corrosión tiende a presentar un comportamiento lineal, esto debido a que en el tiempo analizado no se presenta una pérdida de masa considerable que influye cambios bruscos en la velocidad de corrosión.

Ahora, en la zona de la soldadura de los especímenes se presentan discontinuidades y defectos, en los cuales se puede apreciar el desprendimiento de material, que bajo las condiciones de trabajo a las que estuvieron sometidos dicho desprendimiento no es agresivo. En la Figura 3.22 se puede observar el desprendimiento de material en la zona del cordón de soldadura tanto para el espécimen UIO 1_1 como para GYE 2_1, después del ensayo de corrosión.

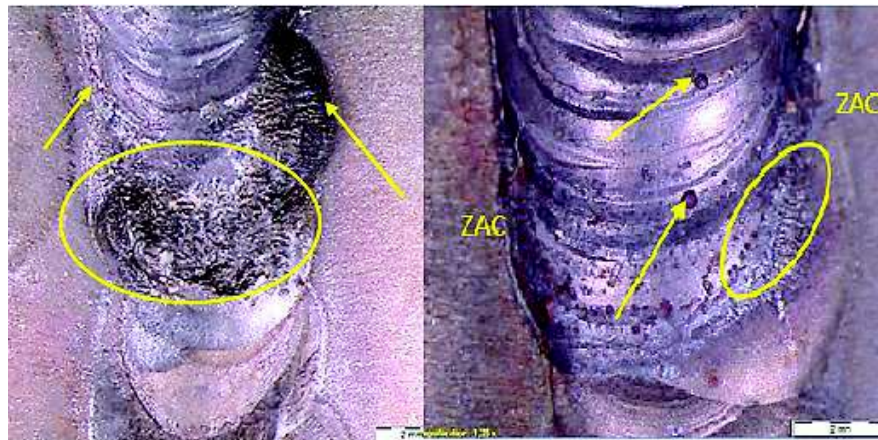


Figura 3.22. Pérdida de material: a) UIO 1_1, b) GYE 2_1.

(Fuente: Propia)

Según (ASM International, 2008) el material se considera “excelente” frente a la corrosión uniforme, si la velocidad de corrosión no excede los 2 mils/año. En el presente estudio la mayor velocidad de corrosión presente es de $7,13 \times 10^{-3}$ mm/año, que transformado a unidades consistentes para su respectiva comparación se tiene un valor de 0,28 mils/año, por lo que se tiene que el material es resistente a la corrosión generalizada.

3.2.8. Ensayo de micro-dureza

En la Tabla 3.22 se muestra los valores promedio de micro-dureza para: probeta testigo, UIO 1_2, GYE 2_1, tomados de los resultados mostrados en la Tabla 3.14, Tabla 3.15, y Tabla 3.16.

El valor máximo de micro-dureza se presenta en el cordón de soldadura, en relación con la zona afectada por el calor y el material base. Este comportamiento es ocasionado debido a la distribución de las fases microestructurales existentes en estas 3 zonas.

Tabla 3.21. Valores promedio de micro-dureza para probeta testigo, UIO 1_1, GYE 2_1.

Denominación	Valores promedio de micro-dureza HV		
	MB	ZAC	CS
Probeta testigo	249,25	249,62	267,05
UIO 1_1	251,58	247,43	266,10
GYE 2_1	260,81	267,08	266,29

(Fuente: Propia)

Kordatos, Forularis & Papadimitriou (2000) indican que cuanto mayor sea el contenido de ferrita, mayor será la micro-dureza, en un valor aproximado de 288 HV para dicha fase. En el cordón de soldadura este valor es mayor que en las otras zonas gracias a que la ferrita es la fase predominante; en base a lo mencionado se tiene que el valor de micro-dureza del presente trabajo no supera al valor dado por el autor. Sin embargo, (Bruno & Martins das Neves, 2016) indica valores de micro-dureza para el material de aporte ER-2594 en un rango de 240 HV – 280 HV, teniendo así valores para el presente trabajo dentro del rango establecido.

Para la zona afectada por el calor se tiene una disminución, debido a la no distribución uniforme de las fases ferrita y austenita por presencia de fases secundarias ya mostradas en este trabajo.

Vasconellos (2008) cita que, los valores de dureza en la zona afectada por el calor y el cordón de soldadura no deben exceder los 330 HV, que al comparar con los valores de este trabajo se comprueba que no exceden dicho valor.

Después que se realiza el ensayo de corrosión, se observa que no existe una variación en los valores que no esté acorde a los valores establecidos para cumplir con este ensayo, esto se ve directamente relacionado con los parámetros de soldadura empleados en este proceso como son: voltaje, amperaje, velocidad de avance y calor de entrada.

Por lo tanto, para la zona del material base, zona afectada por el calor y el cordón de soldadura, cumplen con los valores que ya han sido establecidos anteriormente por otros autores.

3.2.9. Ensayo de dureza

En la Tabla 3.22 se muestran los valores promedios de dureza en el metal base (MB), zona afectada por el calor (ZAC) y material de aporte (CS).

Tabla 3.22. Valores promedio de dureza para probeta testigo, UIO 1_1 y GYE 2_1.

Denominación	Valores promedio de dureza HRC		
	MB	ZAC	CS
Probeta testigo	19	20	21
UIO 1_1	18	19	20
GYE 2_1	18	20	21

(Fuente: Propia)

Como se observa para el material base partiendo de la probeta testigo en comparación con los especímenes ensayados por corrosión, no existen variaciones excesivas en los valores de dureza. La Norma ASTM A790 brinda un valor de dureza máxima de 30HRC para el acero Dúplex 2205, que, al comparar los valores obtenidos en este trabajo con lo otorgado por la norma, estos valores no superan el valor máximo; esto debido a la distribución uniforme de las fases ferrita y austenita.

Para la zona afectada por el calor, tampoco se observa una variación considerable en los valores de dureza para el presente trabajo. Para esta zona, (Bruno & Martins das Neves, 2016), señala un valor de dureza de: 240 – 280 HV (21 – 27 HRC), debido a la distribución de las fases ferrita y austenita; en el presente estudio los valores de dureza son menores debido a la distribución no uniforme de dichas fases ya mencionadas por la aparición de fases secundarias.

Mehdi, Abbas & Morteza (2014), indican que para el material de aporte ER-2594 utilizado para soldar acero Dúplex 2205 se puede obtener valores de dureza de 245 HV, debido a la composición química del material de aporte. La predominancia de la fase ferrita en el material de aporte del presente trabajo permite cumplir con el valor establecido para esta zona.

Después que se realiza el ensayo de corrosión, se observa que no existe una variación en los valores que no esté acorde a los valores establecidos para cumplir con este ensayo, esto se ve directamente relacionado con los parámetros de soldadura empleados en este proceso como son: voltaje, amperaje, velocidad de avance y calor de entrada.

Por lo tanto, para la zona del material base, zona afectada por el calor y el material aporte, cumplen con los valores que ya han sido establecidos anteriormente por otros autores.

3.2.10. Discusión general

- Para el material base se obtienen metalografías que indican que el material fue sometido a un proceso de laminación, además de un tratamiento térmico de recocido proporcionado

por la hoja de vida del material. Esto aumenta las propiedades mecánicas como resistencia a la tracción, cuyos valores superan el valor mínimo establecido por la Norma ASTM A/182/182M-18 de 620 MPa que al comparar con varios autores dichos valores están dentro de los rangos para aceros inoxidables Dúplex laminados y tratados térmicamente.

- Para el proceso de soldadura, el valor de calor entrada está dentro de los parámetros recomendados para la soldadura de este tipo de aceros inoxidables, donde no se genere la formación excesiva de fases secundarias perjudiciales en la zona afectada por el calor y en el cordón de soldadura que afecten a las propiedades del material. Los resultados obtenidos del ensayo de doblado guiado (cara y raíz) muestran la no presencia de discontinuidades, además el ensayo de tracción indica que los valores obtenidos están dentro de los criterios de aceptación otorgados por el Código ASME Sección IX. Los parámetros adecuados de soldadura, los resultados de ensayo de doblado guiado y de tracción cumplen con los criterios de aceptación aprobando el proceso de soldadura. El material de aporte ER-2594, con los parámetros de soldadura establecidos proporciona mayor cantidad de la fase ferrítica, brindando buenas propiedades mecánicas como resistencia a la tracción y dureza que están dentro de los rangos de aceptación proporcionados por autores que realizaron trabajos con dicho material de aporte. Además, de presentar una buena resistencia a la corrosión como se observa en el análisis de dicho parámetro.
- Del ensayo de corrosión realizado, se observa que las condiciones de trabajo a las que estuvieron sometidos los especímenes están muy por debajo de las condiciones de trabajo a las cuales se muestran afectaciones debido a la corrosión por esfuerzos. De los resultados metalográficos de las zonas más relevantes de los especímenes se obtiene que no existe afectaciones producidas por las condiciones de trabajo. Los resultados de micro-dureza y dureza de los especímenes indican que no existe afectación o variaciones significativas en dicha propiedad después de realizar el ensayo de corrosión. El análisis de pérdida de masa y velocidad de corrosión del presente estudio se presentan debido al estar en contacto con el medio corrosivo en las zonas donde se presenten discontinuidades o defectos de soldadura, sin embargo, dichos resultados no se presentan de una manera significativa o excesiva. En base a lo anterior se determina que no existe la presencia de corrosión bajo esfuerzos y de la igual manera la presencia de otros tipos de corrosión durante el tiempo de estudio estipulado para este trabajo.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- ✓ En el presente trabajo de investigación se cumple con los objetivos establecidos.
- ✓ El material de aporte ER-2594 se utiliza para soldadura de aceros inoxidables superdúplex, al aplicarlo en este trabajo brinda buenas propiedades mecánicas como alta resistencia a la tracción y valores de dureza idóneos para su aplicación; y por su alto contenido de cromo en su composición química genera una capa protectora de pasivación que brinda una buena resistencia a la corrosión a las condiciones de trabajo y tiempo analizados en este trabajo.
- ✓ Un rango de calor de entrada de la soldadura entre 2,03 – 2,55 KJ/mm no permite la formación en grandes proporciones de fases secundarias como: sigma (σ), chi (X) y austenita secundaria (γ_2), en la zona afectada por el calor y en el material de aporte, generando afectaciones negativas al realizar el ensayo de corrosión. Además, se obtiene la predominancia de la fase ferrita en el material de aporte que junto a la composición química enriquecida de cromo brinda una buena resistencia a la corrosión durante el tiempo de estudio de este trabajo.
- ✓ La deformación causada dentro de los especímenes no representa obligatoriamente un indicio de corrosión, esto debido a la regeneración de la capa de pasivación con la ayuda del alto contenido de cromo existente en el material de aporte, y evitando así la inclusión del cloro, que podría dañar la superficie generando afectaciones negativas.
- ✓ Las condiciones de trabajo utilizadas como temperaturas de 28 a 30°C, esfuerzos aplicados del 0,1% del límite elástico del material, la composición salina y el agua de mar no presentan las condiciones necesarias para la generación de corrosión bajo esfuerzos durante el tiempo en que se realiza el estudio de este trabajo.
- ✓ Los defectos en el cordón de soldadura tienden a generar un desprendimiento de material debido a la interacción del este con el medio corrosivo, sin embargo, el contenido de cromo presente en dicha zona genera la formación de la capa protectora que impide que el desprendimiento de material sea significativo durante el tiempo de estudio de este trabajo.

4.2. Recomendaciones

- ✓ Se recomienda realizar el proceso de soldadura con este tipo de material de aporte, porque se puede observar que, bajo los parámetros de trabajo, cumple con los objetivos planteados.

- ✓ Realizar un control de temperatura dentro de cada pase durante el proceso de soldadura, esto con el fin de evitar velocidades de enfriamiento bruscos, que nos generarán fases secundarias perjudiciales, que impedirían un mejor análisis de corrosión.

- ✓ Se recomienda realizar una investigación de materiales de aporte con características, propiedades mecánicas similares al material de aporte presentado; con el fin de evaluar procesos de corrosión acelerada en trabajos a futuro.

Referencias Bibliográficas

- [1] Aboulfazl, M., & Iman, D. (2015). Microstructure and Corrosion Resistance of Dissimilar Weld-Joints between Duplex Stainless Steel 2205 and Austenitic Stainless Steel 316L. Abadan: Abadan Faculty of Petroleum Engineering, Petroleum University of Technology, Abadan, Iran.
- [2] ACERINOX. (2013, junio 4). ACERINOX. Retrieved from EN 1.4462 / AISI S31803 (2205): www.acerinox.com
- [3] Alloy wire international. (2018). Alloy wire international. Retrieved from Ficha de datos técnicos Dúplex 2205: www.alloywire.es
- [4] Alvarado, P., & Flores, N. (2006). EVALUACIÓN DE PROCEDIMIENTOS PARA SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS INOXIDABLES. Punta Arenas: Universidad de Magallanes.
- [5] Alvarez, I., & Degallaix, S. (2009). Duplex Stainless Steels. ISTE, Willey.
- [6] Amaury, C. (2006). Efecto de los tratamientos térmicos en la resistencia a la corrosión de un acero súperduplex. Catalunya: Universitat Politècnica de Catalunya.
- [7] American Society for Testing and Materials. (2014). Stress Corrosion Testing STP 425. Baltimore: American Society for Testing and Materials.
- [8] ASM International. (2008). Elements of Metallurgy and Engineering Alloys. ASM International.
- [9] Association, M. (2012). Directrices Prácticas para la fabricación de los Aceros Inoxidables Duplex. Londres.
- [10] ASTM A182/A182M-18. (2017). Standar Specification for Forged or Rolled Alloy and Stainless Pipe Flanges, Forged Fittings, and Valves and Parts for High-Temperature Service. Pennsylvania.
- [11] ASTM A790. (2018). ASTM A790 Standard Specification for Seamless and Welded Ferritic/Austenitic Stainless Steel Pipe. West Conshohocken.
- [12] ASTM D1193. (2018). Standard Specification for Reagent Water. Conshohocken: ASTM.
- [13] Backhouse, A. (2011). Welding of Austenitic & Duplex Stainless Steels - Overview. Sheffield UK: Outokumpu Stainless Distribution.
- [14] Bastidas, M., & Pila, W. (2018). ESTUDIO Y ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL DEL PROCESO ACELERADO DE CORROSIÓN PRESENTADO EN TUBERÍAS DE ACERO DÚPLEX 2205 SOLDADAS MEDIANTE PROCESO GTAW. Quito.
- [15] Battacharya, A. (2008). Stress Corrosion Cracking of Duplex Stainless in Caustic Solutions. Atlanta: Georgia Institute of Technology.
- [16] Bruno, P., & Martins das Neves, M. (2016). Soldagem Circunferencial do Aço Inoxidável Super Duplex UNS S32750 pelo Processo MIG com Controle CMT . Belo Horizonte: Associação Brasileira de Soldagem.

- [17] CODIGO ASME SECCION IX. (1998).
- [18] Fargas, G., Anglada, M., & Mateo, A. (2002). INFLUENCIA DE LAS FASES INTERMETÁLICAS EN LA CORFORMACIÓN DE LOS ACEROS INOXIDABLES DÚPLEX. VIII Congreso Nacional de Propiedades Mecánicas de Sólidos, 77-86.
- [19] GEMA. (2016, junio 27). Tipos de Corrosion. Retrieved from gemaherramientas: <http://www.gemaherramientas.com.ar/tipos-de-corrosion/>
- [20] Giraldo, P., & Duarte, S. (2007). PRECIPITACIÓN DE FASES INTERMETÁLICAS DE ACEROS INOXIDABLES DUPLEX. Pererira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- [21] González, M. (2015). ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN POR PICADURA DE LOS ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS UNS S30403 Y UNS S20100, BAJO NORMA ASTM G48, EN DIFERENTES TIEMPOS DE INMERSIÓN. Pereria: UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA .
- [22] Gunn, R. (1997). Duplex Stainless Steels: Microstructure, properties and applications. ABINGTON PUBLISHING.
- [23] Hilti Corporation. (2015). Corrosion Handbook. Liechtenstein: 9494 Schaan.
- [24] Hsieh, M.-C., Ge, Y., Kahn, H., Michal, G., Ernst, F., & Heuer, A. (2012). Volatility diagrams for the Cr-O and Cr-Cl systems: application to Removal of Cr₂O₃-Rich passive films on stainless steel. The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International 2012.
- [25] Ibarra, M., & Nuñez, E. (2010). Manual ACEROS INOXIDABLES. Chile.
- [26] Iza-Mendia, A., Pinol-Juez, A., & Gutierrez, I. (1998). Estudio de la influencia de la microestructura sobre la deformabilidad en caliente de un acero inoxidable dúplex. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc).
- [27] Jeffus, L. (2008). Manual de Soldadura GTAW (TIG). Madrid: Parainfo.
- [28] Kordatos, J. D., Forularis, G., & Papadimitriou, G. (2000). The effect of cooling rate on the mechanical and corrosion properties of SAF 2205 (UNS 31803) Duplex Stainless welds. Swansea: Scripta Materialia.
- [29] LAEV. (2018). Informe Técnico. Quito.
- [30] Lázaro, A. (2012). PROPIEDADES Y SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS INOXIDABLES.
- [31] LINCOLN ELECTRIC. (2013). Techalloy 2594. Cleveland.
- [32] Medina, N., Rodriguez, E., & Stella, J. (2011). Caracterización microestructural de la precipitación y disolución de la fase sigma en el acero saf 2507. Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela, 45-53.
- [33] Mehdi, R., Abbas, E., & Morteza, S. (2014). Evaluation of Microstructure and Mechanical Properties in Dissimilar Austenitic/Super Duplex Stainless Steel Joint. ASM International.

- [34] MeteqCo. (2018, Mayo 3). MeteqCo. Retrieved from Category Archives: Problemas/Soluciones de la corrosión:
<http://meteqco.com/category/problemassoluciones-de-la-corrosion/>
- [35] Miguel, J. M., & Basco, P. (2011). Soldadura y decapado de aceros inoxidables dúplex y superdúplex. España: Grupo Böhler Soldadura España.
- [36] Milad, S. (2012). Behaviour of Stress Corrosion Cracking of Austenitic Stainless Steels in Sodium Chloride Solutions . Ulu Pauh: Elsevier Ltd.
- [37] Ospina, R., Aguirre, H., & Parra, H. (2007). SOLDABILIDAD EN ACEROS INOXIDABLES Y ACEROS DISIMILES. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- [38] Pramanik, A., Littlefair, G., & Basak, K. (2015). Weldability of Duplex Stainless Steel. Taylor & Francis Group, LLC.
- [39] Raumer. (2013, Abril). LOS ACEROS INOXIDABLES Y LA CORROSIÓN. Retrieved from Raumer climbing:
<https://www.raumerclimbing.com/eng/downl.asp?file=1&nf=4&tbl=downl&ty=2>
- [40] Rodriguez, P. C. (2001). Manual de soldadura. Paraná: Alsina.
- [41] Sáenz, L., Castillo, J., & Márquez, J. (2010). Susceptibilidad a la corrosión del acero inoxidable dúplex 2205 expuesto a inmersión en ácido clorhídrico (HCL). Carabobo: Universidad de Carabobo.
- [42] SOLDEXA. (2017). tigfiler2594. Lima.
- [43] Uhlig, H. (2011). Uhlig's corrosion handbook. New Jersey: Jhon Wiley & Sons, Inc.
- [44] Vasconellos, P. (2008). Soldagem em campo de tubos de aço inox duplex esoldagem em campo de tubos de aço inox duplex. Goytacazes.
- [45] Westin, E. M. (2010). Microstructure and properties of welds in the lean duplex stainless steel LDX2101 (R). Stockholm, Sweden: E-print.

Anexos

ANEXO I. PROPIEDADES DEL ACERO DÚPLEX 2205 SEGÚN NORMA ASTM A182/A182M-18.

**A182/A182M – 18****TABLE 1** *Continued*

Grade	Heat Treat Type	Austenitizing/Solutioning Temperature, Minimum or Range, °F [°C] ^a	Cooling Media	Quenching Cool Below °F [°C]	Tempering Temperature, Minimum or Range, °F [°C]
F 317L	solution treat and quench	1900 [1040]	liquid ^E	500 [260]	^B
F 72	solution treat and quench	1975–2155 [1080–1180]	liquid ^E	500 [260]	^B
F 73	solution treat and quench	1975–2155 [1080–1180]	liquid ^E	500 [260]	^B
F 347	solution treat and quench	1900 [1040]	liquid ^E	500 [260]	^B
F 347H	solution treat and quench	2000 [1095]	liquid ^E	500 [260]	^B
F 347LN	solution treat and quench	1900 [1040]	liquid ^E	500 [260]	^B
F 348	solution treat and quench	1900 [1040]	liquid ^E	500 [260]	^B
F 348H	solution treat and quench	2000 [1095]	liquid ^E	500 [260]	^B
F 321	solution treat and quench	1900 [1040]	liquid ^E	500 [260]	^B
F 321H	solution treat and quench	2000 [1095]	liquid ^E	500 [260]	^B
F XM-11	solution treat and quench	1900 [1040]	liquid ^E	500 [260]	^B
F XM-19	solution treat and quench	1900 [1040]	liquid ^E	500 [260]	^B
F 20	solution treat and quench	1700–1850 [925–1010]	liquid ^E	500 [260]	^B
F 44	solution treat and quench	2100 [1150]	liquid ^E	500 [260]	^B
F 45	solution treat and quench	1900 [1040]	liquid ^E	500 [260]	^B
F 46	solution treat and quench	2010–2140 [1100–1140]	liquid ^E	500 [260]	^B
F 47	solution treat and quench	1900 [1040]	liquid ^E	500 [260]	^B
F 48	solution treat and quench	1900 [1040]	liquid ^E	500 [260]	^B
F 49	solution treat and quench	2050 [1120]	liquid ^E	500 [260]	^B
F 56	solution treat and quench	2050–2160 [1120–1180]	liquid ^E	500 [260]	^B
F 58	solution treat and quench	2085 [1140]	liquid ^E	500 [260]	^B
F 62	solution treat and quench	2025 [1105]	liquid ^E	500 [260]	^B
F 63	solution treat and quench	1900 [1040]	liquid ^E	500 [260]	^B
F 64	solution treat and quench	2010–2140 [1100–1170]	liquid ^E	500 [260]	^B
F 904L	solution treat and quench	1920–2100 [1050–1150]	liquid ^E	500 [260]	^B
F 70	solution treat and quench	1900 [1040]	liquid ^D	500 [260]	^B
Ferritic-Austenitic Stainless Steels					
F 50	solution treat and quench	1925 [1050]	liquid	500 [260]	^B
F 51	solution treat and quench	1870 [1020]	liquid	500 [260]	^B
F 52 ^C			liquid	500 [260]	^B
F 53	solution treat and quench	1880 [1025]	liquid	500 [260]	^B
F 54	solution treat and quench	1920–2060 [1050–1125]	liquid	500 [260]	^B
F 55	solution treat and quench	2010–2085 [1100–1140]	liquid	500 [260]	^B
F 57	solution treat and quench	1940 [1060]	liquid	175 [80]	^B
F 59	solution treat and quench	1975–2050 [1080–1120]	liquid	500 [260]	^B
F 60	solution treat and quench	1870 [1020]	liquid	500 [260]	^B
F 61	solution treat and quench	1920–2060 [1050–1125]	liquid	500 [260]	^B

**A182/A182M – 18****TABLE 2** *Continued*

Grade/Identification Symbol	UNS Designation	Composition, %										
		Carbon	Manganese	Phosphorus	Sulfur	Silicon	Nickel	Chromium	Molybdenum	Columbium	Titanium	Other Elements
F 20	N08020	.07	2.00	0.045	0.035	1.00	32.0–38.0	19.0–21.0	2.00–3.00	8xCmin –1.00	...	Cu 3.0–4.0
F 44	S31254	0.020	1.00	0.030	0.010	0.80	17.5–18.5	19.5–20.5	6.0–6.5	...	...	Cu 0.50–1.00 N 0.18–0.25 N 0.14–0.20 Ce 0.03–0.08
F 45	S30815	0.05–0.10	0.80	0.040	0.030	1.40–2.00	10.0–12.0	20.0–22.0	...	...	...	Cu 0.50
F 46	S30600	0.018	2.00	0.020	0.020	3.7–4.3	14.0–15.5	17.0–18.5	0.20	...	...	Cu 0.50
F 47	S31725	0.030	2.00	0.045	0.030	0.75	13.0–17.5	18.0–20.0	4.0–5.0	...	...	N 0.10
F 48	S31726	0.030	2.00	0.045	0.030	0.75	13.5–17.5	17.0–20.0	4.0–5.0	...	...	N 0.10–0.20
F 49	S34565	0.030	5.0–7.0	0.030	0.010	1.00	16.0–18.0	23.0–25.0	4.0–5.0	0.10	...	N 0.40–0.80
F 56	S33228	0.04–0.08	1.00	0.020	0.015	0.30	31.0–33.0	26.0–28.0	...	0.6–1.0	...	Ce 0.05–0.10 Al 0.025
F 58	S31266	0.030	2.0–4.0	0.035	0.020	1.00	21.0–24.0	23.0–25.0	5.2–6.2	...	...	N 0.35–0.60 Cu 1.00–2.50 W 1.50–2.50
F 62	N08367	0.030	2.00	0.040	0.030	1.00	23.5–25.5	20.0–22.0	6.0–7.0	...	...	N 0.18–0.25 Cu 0.75
F 63	S32615	0.07	2.00	0.045	0.030	4.8–6.0	19.0–22.0	16.5–19.5	0.30–1.50	...	...	Cu 1.50–2.50
F 64	S30601	0.015	0.50–0.80	0.030	0.013	5.0–5.6	17.0–18.0	17.0–18.0	0.20	...	...	Cu 0.35, N 0.05
F 904L	N08904	0.020	2.0	0.040	0.030	1.00	23.0–28.0	19.0–23.0	4.0–5.0	...	...	Cu 1.00–2.00 N 0.10
Ferritic-Austenitic Stainless Steels												
F 50	S31200	0.030	2.00	0.045	0.030	1.00	5.5–6.5	24.0–26.0	1.20–2.00	...	...	N 0.14–0.20
F 51	S31803	0.030	2.00	0.030	0.020	1.00	4.5–6.5	21.0–23.0	2.5–3.5	...	...	N 0.08–0.20
F 69	S32101	0.040	4.00–6.00	0.040	0.030	1.00	1.35–1.70	21.0–22.0	0.10–0.80	...	...	N 0.20–0.25 Cu 0.10–0.80


 **A182/A182M – 18**

TABLE 3 *Continued*

Grade Symbol	Tensile Strength, min. ksi [MPa]	Yield Strength, min, ksi [MPa] ^a	Elongation in 2 in. [50 mm] or 4D, min. %	Reduction of Area, min. %	Brinell Hardness Number, HBW, unless otherwise indicated
F 47	75 [525]	30 [205]	40	50	...
F 48	80 [550]	35 [240]	40	50	...
F 49	115 [795]	60 [415]	35	40	...
F 56	73 [500]	27 [185]	30	35	...
F 58	109 [750]	61 [420]	35	50	...
F 62	95 [655]	45 [310]	30	50	...
F 63	80 [550]	32 [220]	25	...	192 max
F 64	90 [620]	40 [275]	35	50	217 max
F70	70 [480]	25 [175]	35	...	HRB 90 max
F 904L	71 [490]	31 [215]	35	...	...
Ferritic-Austenitic Stainless Steels					
F 50	100–130 [690–900]	65 [450]	25	50	...
F 51	90 [620]	65 [450]	25	45	...
F 52	100 [690]	70 [485]	15	...	...
F 53 ≤ 2 in. [50 mm] ^d	116 [800]	80 [550]	15	...	310 max
F 53 > 2 in. [50 mm] ^d	106 [730]	75 [515]	15	...	310 max
F 54	116 [800]	80 [550]	15	30	310 max
F 55	109–130 [750–895]	80 [550]	25	45	...
F 57	118 [820]	85 [585]	25	50	...
F 59	112 [770]	80 [550]	25	40	...
F 60	95 [655]	65 [450]	25	45	...
F 61	109 [750]	80 [550]	25	50	...

ANEXO II. DOCUMENTOS DE SOLDADURA (WPS, WPQ, PQR).



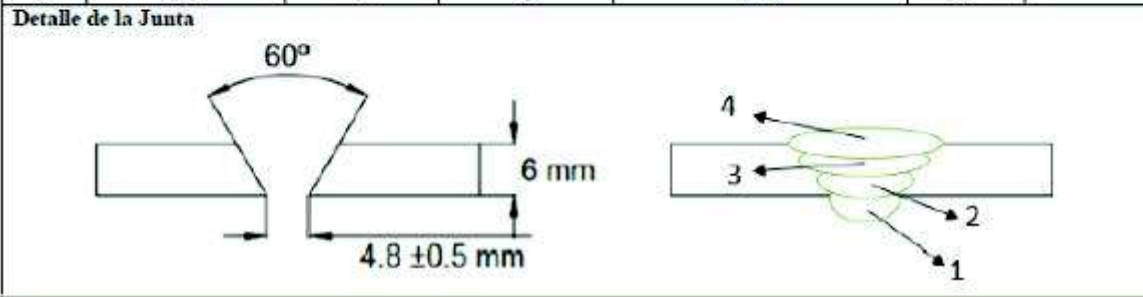
Escuela Politécnica Nacional
Facultad de Ingeniería Mecánica
Estudio de corrosión acelerada sobre una junta soldada
de acero Dúplex 2205 soldado con electrodo ER-2594



No Identificación : E.P.N. 00 Fecha : 26 /02 / 2018 Realizado por : Escola Alvaro, Gavilanes Jhonatan Organización : Escuela Politécnica Nacional		Nombre de la Compañía: E.P.N. WPS No : 1 Según Norma: ASME SECCION IX	
Artículo I. Junta Utilizada Tipo de Junta: Tipo V Abertura raíz: 4.8 ± 0.5 mm Talón: No Ángulo de ranura: 60° Placa de Respaldo: Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/> Preparar base: Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> Método: Torneado		Artículo II. Técnica de Soldadura Proceso de soldadura: GTAW Tipo de soldadura: TIG Electrodo no consumible: Varilla de Tungsteno (2% Th) Manual <input checked="" type="checkbox"/> Semiautomática <input type="checkbox"/> Automática <input type="checkbox"/> Soldadura a: Un lado <input checked="" type="checkbox"/> Dos lados <input type="checkbox"/> N/A <input type="checkbox"/> Cordón de respaldo: Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/> Limpieza: Cepillo, grata y moladora	
Artículo III. Metal Base Especificación: Acero Inoxidable Dúplex 2205 Espesor: 6 mm Diámetro: 115 mm diámetro exterior		Artículo IV. Material de Aporte Diámetro: 2.38 mm (3/32 ") Denominación: Disimil ER-2594 Casa comercial: LINCOLN ELECTRIC	
Artículo V. Posición de la Soldadura Posición de la Soldadura: 6G Progresión: Oscilado Técnica: Empuje y arrastre		Artículo VI. Gas Protección: 99.99% Argón Flujo de gas: 16 a 20 litros/min Respaldo: 25 litros/min	

Artículo VII. Otras Variables:
 Precalentamiento: No Tiempo entre pases: 15 min
 Tipo de corriente: DC⁻

N° Pase	Metal de aporte	Corriente	Voltaje	Velocidad de avance	Técnica de Soldadura	
	Diámetro (mm)	Amperios	Voltios	mm/min	Oscilado	Recto
1	2.38	73	10	21.57	X	
2	2.38	94	10	22.41	X	
3	2.38	99	10	23.25	X	
4	2.38	94	10	24.09	X	





Escuela Politécnica Nacional
Facultad de Ingeniería Mecánica
Estudio de corrosión acelerada sobre una junta soldada
de acero Dúplex 2205 soldado con electrodo ER-2594



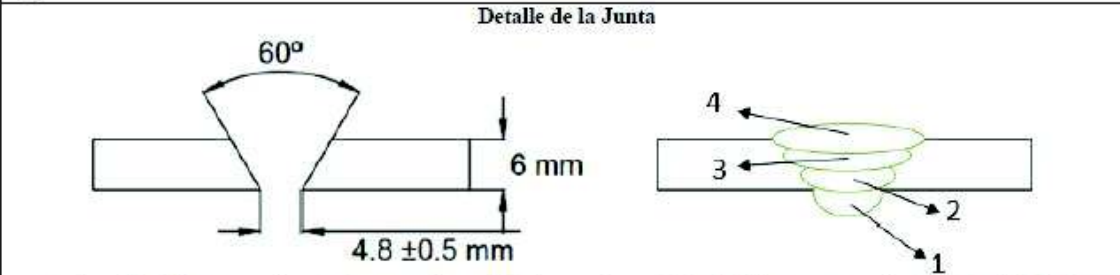
No Identificación : E.P.N. 00 Fecha : 09 /03 / 2018 Realizado por : Escola Alvaro, Gavilanes Jhonatan Organización : Escuela Politécnica Nacional	Nombre de la Compañía: E.P.N. PQR No : 1 Según Norma: ASME SECCION IX
--	---

Artículo I. Junta Utilizada Tipo de Junta: Tipo V Abertura raíz: 4.8 ± 0.5 mm Talón: No Ángulo de ranura: 60° Placa de Respaldo: Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/> Preparar bisel: Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> Método: Torneado	Artículo II. Técnica de Soldadura Proceso de soldadura: GTAW Tipo de soldadura: TIG Electrodo no consumible: Varilla de Tungsteno (2% Th) Manual <input checked="" type="checkbox"/> Semiautomática <input type="checkbox"/> Automática <input type="checkbox"/> Soldadura a: Un lado <input checked="" type="checkbox"/> Dos lados <input type="checkbox"/> N/A <input type="checkbox"/> Cordon de respaldo: Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/> Limpieza: Cepillo, grata y moladora
--	--

Artículo III. Metal Base Especificación: Acero Inoxidable Dúplex 2205 Espesor: 6 mm Diámetro: 115 mm diámetro exterior	Artículo IV. Material de Aporte Diámetro: 2.38 mm (3/32 ") Denominación: Disimil ER-2594 Casa comercial: LINCOLN ELECTRIC
--	--

Artículo V. Posición de la Soldadura Posición de la Soldadura: 6G Progresión: Oscilado Técnica: Empuje y arrastre	Artículo VI. Gas Protección: 99.99% Argón Flujo de gas: 16 a 20 litros/min Respaldo: 25 litros/min
---	--

Artículo VII. Otras Variables
 Pre calentamiento: No
 Tipo de corriente: DC⁻
 Tiempo entre pases: 20 min



N° Pase	Metal de aporte	Corriente	Voltaje	Velocidad de avance	Técnica de Soldadura	
	Diámetro (mm)	Amperios	Voltios	mm/min	Oscilado	Recto
1	2.38	73	10	16.18	X	
2	2.38	94	10	16.96	X	
3	2.38	99	10	17.12	X	
4	2.38	94	10	18.06	X	

ENSAYOS DE TENSION

Id	Ancho Promedio	Espesor Promedio	Carga Máxima registrada		Resistencia a la tracción		Observaciones
	mm	mm	lbf	N	Ksi	Mpa	
T-1	22.48	5.97	24400	108537	117.3	808.7	Falla metal base
T-2	23.17	5.97	23300	103644	108.7	749.3	Falla junta soldada

ENSAYO DE DOBLADO GUIADO

ESPECIMEN N°	TIPO	RESULTADO
S-1	Doblado de cara	Aceptado. No se observa fisuras ni discontinuidades
S-2	Doblado de cara	Aceptado. No se observa fisuras ni discontinuidades
S-3	Doblado de raíz	Aceptado. No se observa fisuras ni discontinuidades
S-4	Doblado de raíz	Aceptado. No se observa fisuras ni discontinuidades



**Escuela Politécnica Nacional
Facultad de Ingeniería Mecánica
Estudio de corrosión acelerada sobre una junta soldada
de acero Duplex 2205 soldado con electrodo ER-2594**



Nombre de la Empresa: EPN
 Nombre del Soldador: Ced.
 Proceso Usado: GTAW Tipo: TIG
 WPS No : 1
 Material Base Soldador: Acero Inoxidable Duplex 2205
 Espesor: 6 mm

VARIABLES DE CADA PROCESO
 RESPALDO: SI NO X
 Especificación del Acero: Acero Inoxidable Duplex 2205
 PLANCHA TUBO (Diámetro): 115 mm diámetro exterior
 Especificación del material de aporte Diámetro: 2.38 mm (3/32")
 Denominación AWS: Disimil ER-2594
 Casa Comercial: LINCOLN ELECTRIC
 Posición de soldadura: 6G
 Progresión: Oscilado.
 Técnica: Empuje y arrastre
 Protección con gas: 99.99% Argon
 Flujo de gas: 16 a 20 litros/min
 Respaldo: 25 litros/min

RESULTADOS DE ENSAYOS DE DOBLADO

ESPECIMEN N°	TIPO	RESULTADO
S-1	Doblado de cara	Aprueba
S-2	Doblado de cara	Aprueba
S-3	Doblado de raíz	Aprueba
S-4	Doblado de raíz	Aprueba

RESULTADO INSPECCION VISUAL

APARIENCIA	Buena
SOCAVAMIENTO	No
POROSIDAD	No
CONVEXIDAD	No
DISCONTINUIDADES	No
FECHA DE ENSAYO	09/03/2018
INSPECCIONADO POR	Ing. Gabriel Velastegui

Observaciones:
 El soldador queda habilitado para la soldadura GTAW proceso TIG posición 6G en tubería

Elaborado por: Escola Álvaro, Gavilanes Jhonatan Aprobado por: Ing. Gabriel Velastegui Fecha: 09-03-2018

**ANEXO III. NÚMERO DE ESPECÍMENES PARA ENSAYO DE
DOBLADO GUIADO Y ENSAYO DE TRACCIÓN SEGÚN LA
NORMA ASME SECCION IX.**

QW-451 Límites de Espesores y Especímenes de Prueba para Calificación de Procedimiento (Cont'n)

QW-451.2

PRUEBAS DE TENSION Y PRUEBAS DE DOBLEZ LONGITUDINAL DE SOLDADURA EN RANURA

Espesor T de Muestra de Prueba Soldada, pulg.	Orden de Espesor T de Metal Base Calificado, pulg. [Nota (1)]		Espesor t de Metal de Soldadura Depositado Calificado, pulg. [Nota (1)]	Máx.	Mín.	Máx.	Tipo y Número de Pruebas Requeridas		
	Pruebas de Tensión y de Doblez Guiado [Nota (2)]						Tensión QW-150	Doblez de Cara QW-160	Doblez de Raíz QW-160
Menos de $\frac{1}{16}$	T	2T	2t				2	2	2
$\frac{1}{16}$ a $\frac{3}{16}$, incl.	$\frac{1}{16}$	2T	2t				2	2	2
Arriba de $\frac{3}{16}$	$\frac{3}{16}$	2T	2t				2	2	2

NOTAS:

(1) Vea QW-403 (.2, .3, .6, .7, .10), QW-404.32 y QW-407.4 para límites adicionales en orden de espesores calificados. Estos También son aplicables a espesores de metal de soldadura depositada. Vea también QW-202 (.2, .3, .4) para excepciones permisibles.

(2) Para combinación de procedimientos de soldar, vea QW-200.4.

ANEXO IV. INFORME TÉCNICO DEL ENSAYO DE TRACCIÓN.



INFORME TÉCNICO

LAEV – MAR.18.09.0

Quito, 7 de marzo de 2018

TRABAJO SOLICITADO POR: ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
M.Sc. Carlos Díaz

Los resultados contenidos en el presente informe corresponden a ensayos realizados en muestras de material metálico pertenecientes a los señores Alvaro Escola y Jhonatan Gavilanes para el proyecto de titulación "ESTUDIO DE CORROSIÓN ACELERADA SOBRE UNA JUNTA SOLDADA DE ACERO DÚPLEX 2205 SOLDADO CON ELECTRODO ER-2594". Las probetas fueron entregadas en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Escuela Politécnica Nacional.

RESULTADOS

1. **MUESTRAS:** Dos (2) probetas extraídas de una junta soldada para ensayo de tracción.

2. ENSAYO DE TRACCIÓN

En la tabla 1 se presenta los resultados del ensayo de tracción realizado a las juntas soldadas.

Tabla 1. Resultados del ensayo de tracción.

Id.	Ancho Promedio	Espesor Promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		Obs.
	mm	mm	lbf	N	ksi	MPa	
T-1	22,48	5,97	24.400	108.537	117,3	808,7	FMB
T-2	23,17	5,97	23.300	103.644	108,7	749,3	FJS

*Falla el material base

*Falla en la junta soldada



LAEV-EPN



Página 1 de 3

En el anexo se presenta la curva de esfuerzo vs. porcentaje de deformación. El porcentaje de deformación corresponde al desplazamiento del cabezal de la máquina universal de ensayos.

	REVISADO POR:	APROBADO POR:
Firma:		
Nombre:	Ing. Jonathan Castro, M.Sc.	Ing. Mario Granja, M.Sc.
Cargo:	TÉCNICO DOCENTE	JEFE

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES



ANEXO

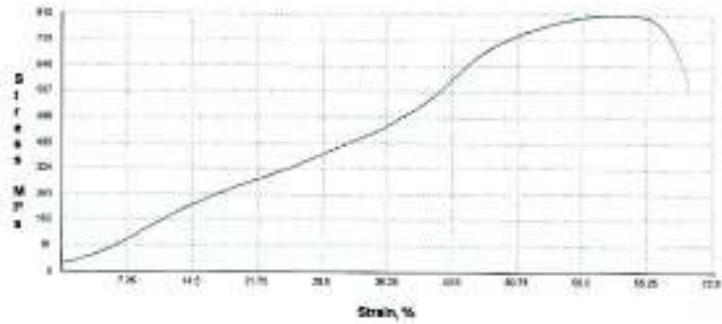


Figura 1. Curva de esfuerzo vs porcentaje de elongación de la probeta T-1.

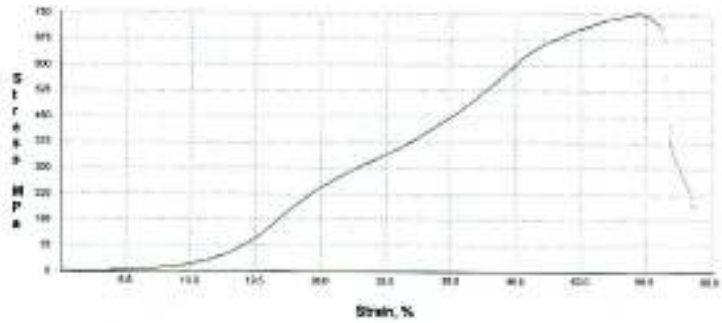







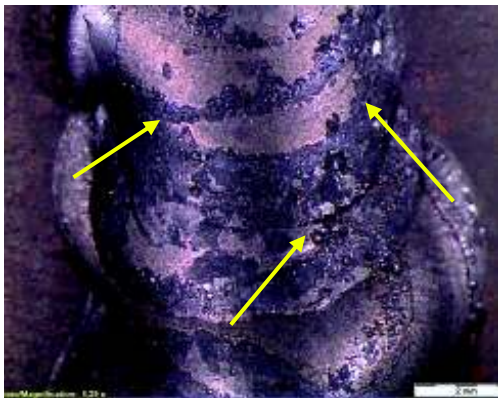



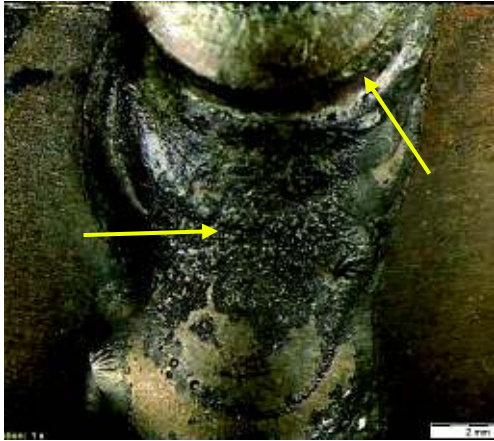


Figura 2. Curva de esfuerzo vs porcentaje de elongación de la probeta T-2.



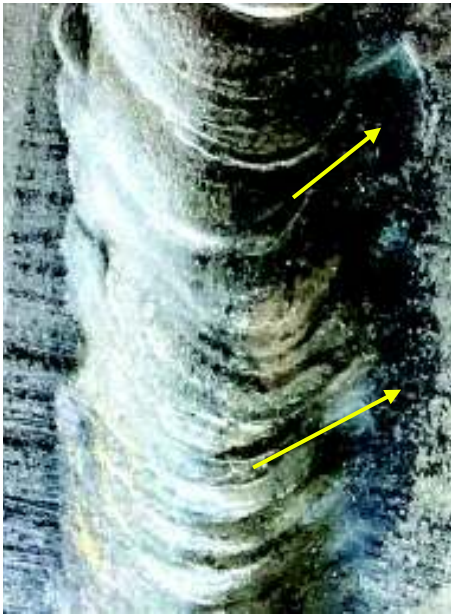



**ANEXO V. RESULTADOS DEL ENSAYO DE CORROSIÓN DE LOS
ESPECÍMENES EN QUITO Y GUAYAQUIL.**





Probetas ensayadas Quito		
Denominación: UIO 2_2	Carga: 5,43 [Nm]	Solución: 5 partes de masa de cloruro de sodio disueltas en 90 partes de agua destilada y 5 partes de cloro líquido.
Tiempo de estudio: 360 horas		Tiempo de estudio: 720 horas
Aumento: 0,4X		Aumento: 1X
		
Se observa la cara de la soldadura sin la presencia de defectos superficiales que afecten la misma.		No se presenta algún tipo de propagación de defectos superficiales en la cara del cordón de soldadura.
Tiempo de estudio: 1080 horas		Tiempo de estudio: 1440 horas
Aumento: 0.63X		Aumento: 1X
		
No se presenta algún tipo de propagación de defectos superficiales en la cara del cordón de soldadura en este tiempo de estudio.		Se denota un cambio de coloración y un ligero desprendimiento de material.

Tiempo de estudio: 1800 horas		Tiempo de estudio: 2160 horas	
Aumento: 0.8X		Aumento: 0.63X	
			
<p>Se mantiene el cambio de coloración y se denota una pérdida de masa en la superficie de la cara del cordón de soldadura. Además, la presencia de porosidades en el borde.</p>		<p>Se observa el cambio de coloración en ciertas zonas de la superficie y en los bordes. Además, en la zona afectada por el calor no presenta algún cambio significativo.</p>	
Denominación: UIO 2_3	Carga: 8,13 [Nm]	Solución: 5 partes de masa de cloruro de sodio disueltas en 95 partes de agua destilada y 5 partes de cloro líquido.	
Tiempo de estudio: 360 horas		Tiempo de estudio: 720 horas	
Aumento: 1X		Aumento: 1.25X	
			
<p>Se observa la pérdida de material en la superficie de la raíz del cordón de soldadura.</p>		<p>En las zonas indicadas se observa un desprendimiento de material en la superficie, que produce una pérdida de material.</p>	

Tiempo de estudio: 1080 horas	Tiempo de estudio: 1440 horas
Aumento: 0.8X	Aumento: 1X
	
La propagación de la pérdida de material en la superficie no presenta un incremento significativo en comparación con la foto anterior.	El desprendimiento de material se hace más notorio en este punto del estudio, como se muestra en la figura.
Tiempo de estudio: 1800 horas	Tiempo de estudio: 2160 horas
Aumento: 0.63X	Aumento: 1X
	
Se presenta un ligero desprendimiento de material a lo largo de la superficie del cordón de soldadura (raíz), en relación al tiempo anterior.	En la zona afectada por el calor no se presenta algún cambio significativo en cuanto al desprendimiento del material, analizado en los tiempos anteriores.

(Fuente: Propia)

Probetas ensayadas Guayaquil		
Denominación: GYE 2_2	Carga: 5,43 [Nm]	Solución: Agua de mar
Tiempo de estudio: 720 horas		Tiempo de estudio: 1440 horas
Aumento: 0.63X		Aumento: 0.63X
		
<p>Se presenta un ligero cambio de coloración en los bordes de la superficie del cordón de soldadura (cara), que no es significativo para este tiempo de estudio.</p>		<p>Se observa un cambio de coloración como se muestra en la figura debido a la capa de óxido formada.</p>
Tiempo de estudio: 2160 horas		
Aumento: 0.5X		Aumento: 0.8X
		
<p>La decoloración que se presenta resulta no ser significativa para este proceso de soldadura.</p>		

Denominación: GYE 1_3	Carga: 8,13 [Nm]	Solución: Agua de mar
Tiempo de estudio: 720 horas		Tiempo de estudio: 1440 horas
Aumento: 0.63X		Aumento: 0.63X
		
Se observa una falta de fusión en el cordón de soldadura, además del cambio de coloración en los bordes.	Se presenta un leve desprendimiento de material como se muestra en la figura. Además, de un cambio de coloración en los bordes producido por la capa de óxido.	
Tiempo de estudio: 2160 horas		
Aumento: 1.25X	Aumento: 1.25X	
		
En la zona afectada por el calor no se muestra algún tipo de discontinuidad, se observa desprendimiento de material, que, no es significativo para este estudio.		

(Fuente: Propia)

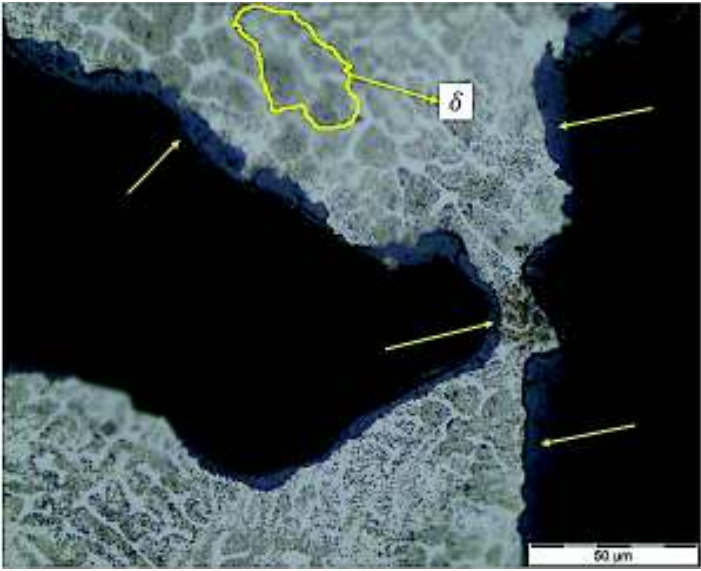
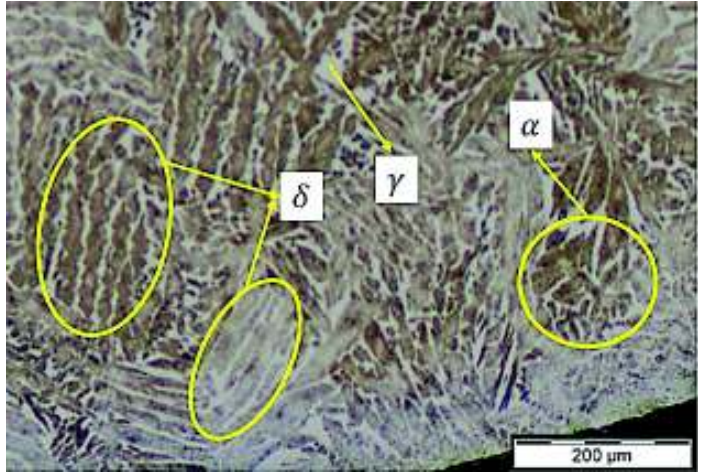
**ANEXO VI. RESULTADOS DE PÉRDIDA DE MASA DE LOS
ESPECÍMENES EN QUITO Y GUAYAQUIL.**

Pérdida de masa							
Quito							
Denominación: UIO 2_2							
Tiempo de corrosión [horas]	0	360	720	1080	1440	1800	2160
Masa [gr]	233,77	233,76	233,74	233,70	233,69	233,68	233,64
Δ Masa [g]	0,13						
Denominación: UIO 2_3							
Tiempo de corrosión [horas]	0	360	720	1080	1440	1800	2160
Masa [gr]	241,15	241,14	241,12	241,09	241,07	241,05	241,03
Δ Masa [g]	0,12						
Guayaquil							
Denominación: GYE 2_2							
Tiempo de corrosión [horas]	0	360	720	1080	1440	1800	2160
Masa [gr]	229,55	-	229,52	-	229,50	-	229,46
Δ Masa [g]	0,09						
Denominación: GYE 1_3							
Tiempo de corrosión [horas]	0	360	720	1080	1440	1800	2160
Masa [gr]	245,35	-	245,32	-	245,30	-	245,27
Δ Masa [g]	0,08						

(Fuente: Propia)

**ANEXO VII. METALOGRAFÍAS DE LOS ESCPECÍMENES
DESPUÉS DEL ENSAYO DE CORROSIÓN.**

METALOGRAFÍAS DE LOS ESPECÍMENES UIO 2_2 y UIO 2_3.

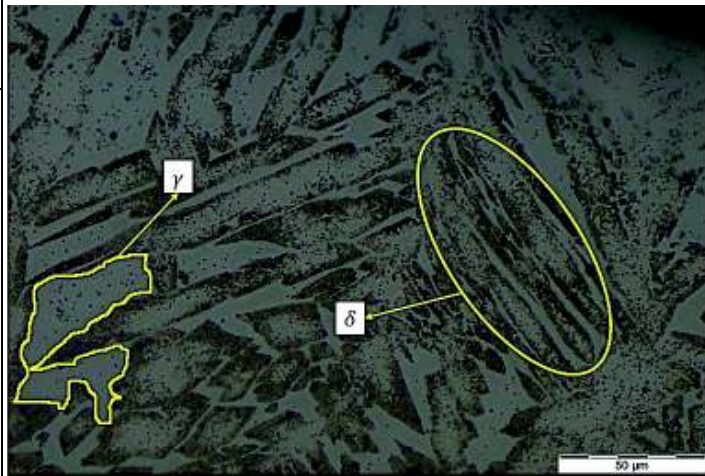
<p>Microestructura del cordón de soldadura (raíz) en aumento 100X del espécimen UIO 2_2</p>	
<p>Microestructura del cordón de soldadura (raíz) en aumento 100X del espécimen UIO 2_3</p>	

(Fuente: Propia)

METALOGRAFÍAS DE LOS ESPECÍMENES GYE 2_2 y GYE 1_3.

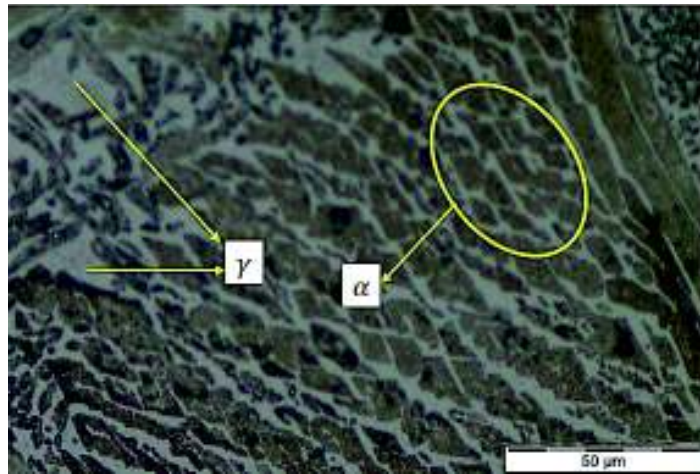
Microestructura del cordón de soldadura (cara) en aumento 500X del espécimen GYE 2_2

La ferrita δ se presenta de manera alargada en mayor proporción que la austenita γ .



Microestructura del cordón de soldadura (cara) en aumento 500X del espécimen GYE 1_2

Existe mayor presencia de ferrita α , y en ciertas zonas la aparición de la austenita γ .



(Fuente: Propia)

ANEXO VIII. HOJA DE VIDA DEL MATERIAL BASE.

4102

HUZHOU HUADING STAINLESS STEEL TUBE INDUSTRY CO.,LTD.

PACKING LIST

ADD:HEPING INDUSTRY AREA, CHANGNING TOWN, HUZHOU, ZHEJIANG, CHINA
Tel:86-572-6656319 Fax:86-572-6950327

EMPRESA PUBLICA FLOTA PETROLERA ECUATORIANA - EP FLOPEC
AV. AMAZONAS N34-108 Y LUIS DORCERO QUITO, ECUADOR TEL: 59342307753 RUC: 1755164300001

ORIGINAL

INVOICE NO.: HD-20130110-1
DATE: Jan. 10th, 2013

From: SHANGHAI Port, CHINA TO: Guayaquil port, Ecuador

No.	Description	Total pcs	Shipping Marks	PACKING	Net weight(kg)	Gross Weight(kg)
1	14"XSCH10S S31603	66	DESTINATION: GUAYAQUIL PORT, ECUADOR SIZE MATERIAL STANDARD: ASTM A750 / UNS S31603 WEIGHT: MADE IN CHINA	Barre pipe w/ Metal wrapping * Bundle packing / Container Shipment	27.302	28.482
Total		66			27302	28482

Handwritten signature and initials in the table area.

Handwritten date: 14.08.13

Handwritten signature and name: O. J. Macias / J. Macias

HUZHOU HUADING STAINLESS STEEL TUBE INDUSTRY CO.,LTD.

FR-36024/3/10
4/33



ITEM 5
MILL TEST REPORT

RM ID NUMBER
114229
SALES ORDER / RLS
006113 / 30
CERT ID / REV
00051550 / 01

SOLD TO

PINACLE STAINLESS STEEL, INC
455 AMBASSADOR DRIVE
MISSISSAUGA, ON L5T 2J3
CANADA

CUSTOMER P.O. 88892	CUSTOMER PART	HEAT NO. B23788						
DESCRIPTION: 312004052900190 12" WELDED PIPE SCHED 40S DUPLEX 2205D (UNSN S32256/S31803) A790								
CERTIFICATION REQUIREMENTS								
ENGINEERING ASTM A790/09a (ASME SA790-10, No ADD.								
HYDRO PRESSURE 1,980 PSI								
HEAT TREAT Annealed at 1950 Deg F. and water quenched to below 800 Deg. F. in less than 3 minutes.								
Chemical								
C	Cr	Mo	Ni	PL	N	P	SI	S
0.03	22.6	1.91	3.1	8.9	16	.024	.55	.00
TEST			UNITS	Mechanical		RESULTS		
Tensile PSI			PSI	116000				
Yield PSI			PSI	60000				
Elong %				35				
Hardness								
HB248								
TEST			RESULT	Corrosion		RESULTS		
TG Band			Pass					
TEST			UNITS	Corrosion		RESULTS		
A923 "C"			MOD					

This report shall not be altered or reproduced, except in full, without the prior written approval of Brismet Metals LLC.
This test report represents the actual attributes of the items furnished and all items were manufactured, sampled, inspected, and tested in full compliance with applicable specifications and your purchase order.
Certification is in accordance with EN ISO 9001 type 3, 1.
Chemical content is % by weight. Mechanical test results are in English units (pounds and pounds).
No weld repairs have been performed on the base material.
Hardness in accordance with NACE MR0175 and MR0103 and material is free of cold work to enhance mechanical properties.
Pipe is Padded and Passivated in accordance with ASTM A300.
Brismet Metals has a Quality Management System in place that is in compliance with ISO 9001:2008.
Brismet Metals does not add mercury during any manufacturing process.
NAPTA country of origin: USA. Pipe/Tube Manufactured in the USA.
Raw Material Mill Source: Japan
FAR BAA- Cannot certify compliance, DFARS BAA- Cannot certify compliance, FAA TAA- Complies

Rick Dawson
Rick Dawson - Quality Assurance Mgr

**ANEXO IX. DETALLE DE CÁLCULO DE CROMO Y NÍQUEL
EQUIVALENTES.**

Dada la siguiente fórmula por (Ospina, Aguirre, & Parra, 2007), se realiza el cálculo de cromo y níquel equivalentes, tanto para el material base como para el material de aporte ER-2594.

Material base:

Datos:

% Cr = 22, % Mo = 3, % Si = 1, % Nb = 0, % Ni = 5,5, % C = 0,03, % Mn = 2.

$$\text{Cromo equivalente} = \% \text{ Cr} + \% \text{ Mo} + 1,5\% \text{ Si} + 0,5\% \text{ Nb}$$

$$\text{Cromo equivalente} = 22 + 3 + 1,5 (1) + 0,5 \cdot (0)$$

$$\text{Cromo equivalente} = 26,50\%$$

$$\text{Níquel equivalente} = \% \text{ Ni} + 30\% \text{ C} + 0,5\% \text{ Mn}$$

$$\text{Níquel equivalente} = 5,5 + 30 \cdot (0,03) + 0,5 \cdot (2)$$

$$\text{Níquel equivalente} = 7,40\%$$

Material aporte:

Datos:

% Cr = 24,6, % Mo = 3,8, % Si = 0,3, % Nb = 0, % Ni = 8,6, % C = 0,02, % Mn = 0,8.

$$\text{Cromo equivalente} = \% \text{ Cr} + \% \text{ Mo} + 1,5\% \text{ Si} + 0,5\% \text{ Nb}$$

$$\text{Cromo equivalente} = 24,6 + 3,8 + 1,5 (0,3) + 0,5 \cdot (0)$$

$$\text{Cromo equivalente} = 28,85\%$$

$$\text{Níquel equivalente} = \% \text{ Ni} + 30\% \text{ C} + 0,5\% \text{ Mn}$$

$$\text{Níquel equivalente} = 8,6 + 30 \cdot (0,02) + 0,5 \cdot (0,8)$$

$$\text{Níquel equivalente} = 9,60\%$$

**ANEXO X. DETALLE DE CÁLCULO DEL ESFUERZO APLICADO
CON RESPECTO AL LÍMITE ELÁSTICO.**

Del trabajo realizado por (Bastidas & Pila, 2018) para el cálculo del esfuerzo utilizado sobre los especímenes aplicamos la ecuación.

$$P = \frac{6 \cdot Y \cdot E \cdot D}{L^2}$$

Donde:

Y: deformación = 0,37 mm

Módulo de elasticidad: $190 \cdot 10^9$ Pa

D: ancho = 0,0062 m

L: longitud = 0,21 m

Límite elástico = 450 MPa

$$P = \frac{6 \cdot (0,37 \text{ m}) \cdot (190 \cdot 10^9 \text{ Pa}) \cdot (0,21 \text{ m})}{(0,21)^2}$$

$$P = 59,30 \text{ MPa}$$

∴ Corresponde al 0,1 % del Límite elástico

**ANEXO XI. DETALLE DE CÁLCULO DEL ÍNDICE DE PICADURAS
(PREN) DEL ACERO DÚPLEX 2205**

Para determinar el índice de picaduras o pitting index (PREN) del acero inoxidable Dúplex 2205 se utiliza la ecuación proporcionada por (Lázaro, 2012) basado en la composición química del acero.

Datos:

% Cr = 22, % Mo = 3, % N = 0,14

$$\text{PREN} = \% \text{Cr} + 3,3 \cdot \% \text{Mo} + 16 \cdot \% \text{N}$$

$$\text{PREN} = 22 + 3,3 \cdot (3) + 16 \cdot (0,14)$$

$$\text{PREN} = 34,14$$