



## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**



### **ESTUDIO Y ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL DEL PROCESO ACELERADO DE CORROSIÓN PRESENTADO EN TUBERÍAS DE ACERO DÚPLEX 2205 SOLDADAS MEDIANTE PROCESO GTAW**

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

**BASTIDAS BASTIDAS MERCEDES GABRIELA**  
mercedes.bastidas@epn.edu.ec

**PILA MUSO WILSON XAVIER**  
wilson.pila@epn.edu.ec

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

**CO-DIRECTOR: ING. ESPINOSA CHAUVIN DIEGO MARCELO**  
diego.espinosa@epn.edu.ec

Quito, agosto 2018

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por los señores **BASTIDAS BASTIDAS MERCEDES GABRIELA y PILA MUSO WILSON XAVIER**, bajo mi supervisión.

---

Ing. Carlos Wime Díaz Campoverde, M.Sc.

**DIRECTOR DE PROYECTO**

---

Ing. Diego Marcelo Espinosa Chauvín

**CODIRECTOR DE PROYECTO**

## DECLARACIÓN

Yo, **Mercedes Gabriela Bastidas Bastidas y Wilson Xavier Pila Muso**, 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.

---

Mercedes Gabriela Bastidas Bastidas

---

Wilson Xavier Pila Muso

## DEDICATORIA

Dedico a mis padres Ángel y América por su apoyo incondicional

Gaby

## AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento se dirige a quienes han formado mi camino y me han dirigido por el sendero correcto a la Virgencita de Baños y al Niño Jesús, quienes han estado en todo momento conmigo dándome el valor necesario para terminar esta etapa de mi vida.

A mis padres por haberme forjado como la persona que soy, todos mis logros se los debo a ustedes entre los que se incluye este trabajo de titulación. Me formaron con amor, cariño, reglas y con algunas libertades, pero al final, me motivaron constantemente para alcanzar mis anhelos y todas las metas propuestas. A mis hermanos María Jesús, Andrés y Alexander quienes estuvieron conmigo desde el inicio apoyándome de manera incondicional, siempre confiaron en mí, a mis bebés preciosos que siempre me han alegrado la vida Bruno y Mateo, y qué seré un ejemplo para ellos.

A mis amigos de la universidad en quienes pude confiar y compartir momentos maravillosos, sobre todo a los del grupo 206, quienes fueron como mi segunda familia gracias por todo, a mis compañeros de la poli quienes estuvieron conmigo en las buenas y en las malas durante esta trayectoria Michael, Santy, Sandy, Gabo y Puka, a mis amigas Andre, Fátima, Meyfi y Jazz que siempre me brindaron su amistad incondicional, les quiero “ponnys” y “rabitos”.

Y finalmente a las personas con las que compartí estos últimos momentos de mi trayectoria universitaria, a mi querido director de tesis Ing. Carlos Díaz, al Ing. Diego Espinosa por toda su ayuda en el transcurso del trabajo de titulación siendo co-director, al Ing. Gabriel Velasteguí, Jorge Guzmán, al Tnlgo. René Jame, a la Ing. Patricia Proaño, a los chicos del laboratorio de metalografía que siempre han estado apoyándonos en especial a Tebo. A mis compañeros de trabajo Pame, Henry, Charly, Javy, Edgar y Andritz que siempre me han estado apoyando en la culminación éste trabajo y a mi compañero de tesis Xavy que siempre ha estado en esta etapa, que con altibajos hemos logrado culminar éste trabajo con éxito.

Gaby

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo principalmente a Dios y la virgen de El Cisne, por ser mis confidentes y fortalecer mi corazón con su infinita bondad y amor. A mis queridos padres, Luis Pila y María Muso, por ser los pilares fundamentales en todo lo que soy y mostrarme con amor el camino hacia la superación con ejemplo de trabajo constante y sacrificio. A mis hermanas Mayra y Jenny, por sus consejos, el cariño y el apoyo incondicional que me brindaron siempre. A mis sobrinos Luis y Anthony, para que vean en mi un ejemplo a seguir. A mis cuñados Klever y José, por estar conmigo y apoyarme siempre como verdaderos hermanos. A mis abuelitos paternos Jorge y María y a mis abuelitos maternos Francisco y Delia por ser los ejes donde mi familia se ha formado y ha visto en ellos un ejemplo de perseverancia y constancia.

**¡Lo logramos!**

Xavi

## AGRADECIMIENTO

En primer lugar, doy infinitas gracias a la virgen de El Cisne por escuchar mis pequeñas historias, lamentos, tristezas y alegrías al terminar cada jornada en la universidad, dándome fuerza y valor para culminar esta etapa de mi vida.

A mi familia por motivarme a ser mejor cada día, con sus sabios consejos, su trabajo constante y el apoyo total en cada momento y en todo lugar.

Al Ing. Carlos Díaz, Ing. Patricia Proaño y Téc. René Jame quienes conforman el Laboratorio de Desgaste y Falla, por todos los conocimientos brindados, la sincera amistad y siempre estar atentos de mi desarrollo en esta última etapa.

Al Ing. Marcelo Espinosa, Ing. Gabriel Velastegui y Jorge Guzmán por toda la colaboración brindada, durante la elaboración de esta tesis.

Al Dr. Ramiro Guerra por estar siempre pendiente de mi salud, como un amigo y consejero, y sobre todo como ejemplo de un gran profesional.

A Ely, Adrian, Santiago y Ángel mis mejores amigos, por su amistad sincera, su apoyo incondicional en el transcurso de mi carrera universitaria y por ayudarme a superar cada uno de los momentos difíciles en esta etapa.

A Josselyn, Danny y Melany, por confiar en mí como un maestro, amigo y tutor en el crecimiento de su vida académica.

A Fabian Aviles mi hermano adoptivo, por ser el amigo infallible en todo momento, junto a Monica, Mirian y Sarita que siempre me recibirán en mi lejana tierra.

A mis nuevos amigos Tebo, Juan, Andrea, Daysi, Dayana, Evelyn, Alvaro, Denis y Gabo, por ayudarme en cada momento crítico de este trabajo, pues con sus acciones han llenado de alegría y risas cada uno de esos instantes.

Y a ti rojita por haber formado parte especial de mi vida, nunca te olvidare.

Xavi

# ÍNDICE

CERTIFICACIÓN.....	i
DECLARACIÓN.....	ii
DEDICATORIA .....	iii
AGRADECIMIENTO .....	iv
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTO .....	vi
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT .....	xv
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>Objetivo general .....</b>	<b>2</b>
<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>2</b>
<b>1. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>3</b>
<b>1.1. Desarrollo histórico .....</b>	<b>3</b>
<b>1.2. Acero inoxidable dúplex 2205.....</b>	<b>4</b>
1.2.1. Composición química.....	4
1.2.2. Fases secundarias en los aceros inoxidables dúplex.....	6
1.2.3. Propiedades físicas y mecánicas .....	8
1.2.4. Resistencia a la corrosión.....	8
1.2.5. Microestructura .....	9
1.3. Proceso GTAW.....	9
1.3.1. Gas de protección argón.....	9
1.4. Varilla de aporte ER2209 3/32 .....	10
1.5. Tipos de corrosión.....	10
1.5.1. Corrosión general .....	11
1.5.2. Corrosión intergranular .....	11
1.5.3. Ataque por picadura (Pitting).....	11
1.5.4. Corrosión por tensión .....	13
1.5.5. Corrosión por microorganismos.....	14
1.6. Corrosión en entornos específicos .....	14
1.6.1. Fluido de servicio (agua de mar) .....	15
1.6.2. Resistencia a la corrosión de los materiales.....	15
1.7. Resistencia a la corrosión de los materiales.....	16
<b>2. METODOLOGÍA .....</b>	<b>18</b>

2.1. Ensayo de tracción.....	18
2.1.1. Probetas de ensayo de tracción .....	18
2.1.2. Equipo de ensayo de tracción.....	19
2.2.3. Procedimiento de ensayo de tracción.....	19
2.2. Proceso de soldadura GTAW .....	20
2.2.1. Probetas para la soldadura .....	21
2.2.2. Equipos para soldadura .....	21
2.2.3. Procedimiento para la soldadura.....	22
2.3. Ensayo de doblez guiado.....	22
2.3.1. Doble transversal de cara.....	23
2.3.2. Doble transversal de raíz.....	23
2.3.3. Probetas de ensayo de doblez guiado.....	23
2.3.4. Equipo de ensayo de doblado guiado.....	24
2.3.5. Procedimiento de ensayo de doblez guiado .....	24
2.4. Ensayo de proceso de corrosión bajo esfuerzos .....	24
2.4.1. Velocidad de corrosión.....	25
2.4.2. Probetas para ensayo de corrosión .....	26
2.4.3. Portaprobetas para corrosión bajo esfuerzos .....	26
2.4.4. Distribución de muestras .....	27
2.4.5. Equipo de corrosión.....	28
2.4.6. Procedimiento de proceso de corrosión .....	29
2.5. Análisis metalográfico.....	30
2.5.1. Probetas para análisis metalográfico .....	31
2.5.2. Equipo de metalografía.....	32
2.5.3. Procedimiento de ensayo de metalografía.....	33
2.6. Ensayo de microdureza.....	33
2.6.1. Probetas para ensayo de microdureza .....	33
2.6.2. Equipo para ensayo de microdureza .....	34
2.6.3. Procedimiento de ensayo de microdureza .....	34
2.7. Ensayo de dureza .....	35
2.7.1. Probetas para ensayo de dureza.....	35
2.7.2. Equipo para ensayo de dureza.....	35
2.7.3. Procedimiento del ensayo de microdureza .....	36
2.8. Ensayo de microscopía electrónica de barrido EDS .....	36
2.8.1. Probetas para el ensayo de microscopía electrónica de barrido .....	37

2.8.2. Equipo para microscopía electrónica de barrido .....	37
2.8.3. Procedimiento para análisis de composición química .....	38
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>39</b>
<b>3.1. Resultados .....</b>	<b>39</b>
3.1.1. Resultados del ensayo de tracción .....	39
3.1.2. Resultados del proceso de soldadura.....	40
3.1.3. Resultados del ensayo de doblez guiado.....	40
3.1.4. Resultados del ensayo de corrosión .....	41
3.1.5. Resultados de la velocidad de corrosión.....	43
3.1.6. Resultados del análisis metalográfico.....	44
3.1.7. Resultados del ensayo de microdureza.....	49
3.1.8. Resultados del ensayo de dureza .....	51
3.1.9. Resultados del ensayo de microscopia electrónica de barrido EDS .....	53
<b>3.2. Discusión.....</b>	<b>54</b>
3.2.1. Discusión del ensayo de tracción .....	54
3.2.2. Discusión del ensayo de soldadura y doblado guiado.....	55
3.2.3. Discusión del ensayo de corrosión.....	56
3.2.4. Discusión del análisis metalográfico .....	59
3.2.5. Discusión del ensayo de microdureza .....	66
3.2.6. Discusión del ensayo de dureza.....	67
3.2.7. Discusión del ensayo de microscopía electrónica de barrido EDS.....	68
3.2.8. Discusión del medio corrosivo .....	68
3.2.9. Discusión general .....	69
<b>4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>70</b>
4.1. Conclusiones .....	70
4.2. Recomendaciones .....	71
<b>Referencias Bibliográficas .....</b>	<b>72</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>75</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Curvas de esfuerzo-deformación de aceros inoxidable sobresalientes en el mercado.....	8
Figura 1.2. Microestructura del acero inoxidable dúplex 2205 de a) acero laminado en caliente y b) acero fundido. ....	9
Figura 1.3. Análisis porcentual de los tipos de corrosión presentes en las aplicaciones industriales. ....	10
Figura 1.4. Tipos de corrosión originados en los metales. ....	11
Figura 1.5. Proceso de repasivación en un metal con picadura.....	12
Figura 1.6. Valor del PREN para aceros dúplex más populares en el mercado. ....	12
Figura 1.7. Capa o película protectora superficial de los aceros inoxidables. ....	13
Figura 2.1. Dimensiones de probeta de tracción. ....	19
Figura 2.2. Dimensiones del bisel en V realizado en la tubería. ....	21
Figura 2.3. Procesos de doblez guiado y zona de análisis. ....	23
Figura 2.4. Dimensiones de probetas de doblez guiado.....	23
Figura 2.5 Velocidad de corrosión [mm/año] para acero 316L y DX2205.....	26
Figura 2.6. Dimensiones de probetas para ensayo de corrosión. ....	26
Figura 2.7. Metodología de corrosión a) Portaprobetas b) Fuerzas aplicadas sobre la probeta y c) Montaje de probetas en porta probetas.....	27
Figura 2.8. Probeta para ensayo de corrosión a) Sección a cortar marcada en la probeta y b) Corte transversal para análisis metalográfico. ....	31
Figura 2.9. Probeta para el ensayo metalográfico a) Moldeado de la probeta y b) Probeta montada.....	31
Figura 2.10. Probeta para el ensayo de microdureza y zonas de medición. ....	34
Figura 2.11. Probeta para ensayo de dureza y líneas de barridos de medición. ....	35
Figura 2. 12. Dimensiones de probeta para microscopía electrónica de barrido. ....	37
Figura 3.1. Probetas del material base ensayadas bajo tracción. ....	39
Figura 3.2. Probetas ensayadas en doblez guiado, (a) de cara y (b) raíz.....	40
Figura 3.3. Ángulo y altura [mm] de deformación de las probetas de corrosión con torques de (a) 2,71 [Nm], (b) 5,42 [Nm] y (c) 8,13 [N m].....	42
Figura 3.4. Microestructura del material base (500X). ....	46
Figura 3.5. Zonas de análisis para el ensayo de microdureza HV. ....	49
Figura 3.6. Variación de la microdureza en la zona Z1.....	49
Figura 3.7. Variación de la microdureza en la zona Z2.....	50
Figura 3.8. Variación de la microdureza en la zona Z3.....	50
Figura 3.9. Variación de la microdureza en la zona Z4.....	51
Figura 3.10. Resultados de la medición de dureza HRC en la probeta P3.....	52
Figura 3.11. Resultados de la medición de dureza HRC en la probeta P5.....	52
Figura 3.12. Resultados de la medición de dureza HRC en la probeta P6.....	53
Figura 3.13. Microscopía electrónica de barrido, (a) zona de análisis y (b) representación de la variación de energía por EDS. ....	53
Figura 3.14. Comparación de los resultados vs. la norma ASTM-A790 y fabricantes.....	55
Figura 3. 15. Variación de la masa en las probetas con T=8,18 [Nm]. ....	56
Figura 3. 16. Variación de la masa en las probetas con T=5,42 [Nm]. ....	56
Figura 3. 17. Variación de la masa en las probetas con T=2,71 [Nm]. ....	57
Figura 3.18. Coloración presenciada en las probetas, a) P3, b) P11y C) P33 a 4X. ....	57

Figura 3. 19. Velocidad de corrosión para las probetas (a) P6 con T= 2,71 [Nm], (b) P5 con T= 5,42 [Nm] y (c) P3 con T=8,13 [Nm] en un tiempo de 2160 horas de exposición y (d) P11 con T=8,13 [Nm] en 720 horas de exposición.....	58
Figura 3.20. Desprendimiento de material en el borde del cordón (500X).....	59
Figura 3.21. Microestructura del material base, (a) micrografía del material en la condición de entrega, (b) micrografía del material tratado térmicamente y (c) micrografía del material de investigación con efecto blanco negro (500X).....	60
Figura 3.22. Microestructura de la probeta P5 (a) pase inicio y (c) pase de terminación a 100X, en la soldadura.....	61
Figura 3.23. Micrografías de los aceros tratados térmicamente a 850°C de un material a) UNS S32750 y b) UNS S32760 a 500X.....	62
Figura 3.24. Fotomicrografías obtenidas por microscopía óptica de muestras de acero SAF 2507 tratadas a 850°C (500X).....	62
Figura 3.25. Microscopía de las probetas (a) P3 y (b) P5 a 500X.....	63
Figura 3.26. Corrosión afectando como: (a) ataque preferencial a la interface y disolución preferencial de la fase ferrítica, (b) y (c) morfología de las picaduras en C3F.....	63
Figura 3.27. Proceso de corrosión suscitada en las probetas (a) P3, (b) P6 y (c) P5 a 500X.....	63
Figura 3.28. Micrografía de la corrosión intergranular en la zona soldada de un material 1.4401.....	64
Figura 3.29. Resultados de la investigación en las probetas (a) P3, (b) P5 y (c) P6 a 500X.....	64
Figura 3.30. Resultados obtenidos en las probetas (a) P3, (b) P6 y (c) P5 a 4X.....	65
Figura 3.31. Defectos del proceso de soldadura.....	65
Figura 3.32. Picaduras en la metalografía de la probeta P3 a 500X.....	65
Figura 3.33. Marca del indentador en las probetas (a) P5, P11.....	66
Figura 3.34. Marca del indentador en la probeta P5 a 500X.....	66
Figura 3. 35. Promedio de las durezas HRC, resultantes de las diferentes zonas.....	67
Figura 3. 36. Metalografía del pase raíz de la probeta P5 a 500X.....	67
Figura 3. 37. Metalografía de inclusiones presentadas en zonas cercanas al ZAZ (P6 a 100X).....	68

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Clasificación y descripción de los aceros inoxidables. ....	3
Tabla 1.2. Equivalencias entre nomenclaturas del acero dúplex 2205.....	4
Tabla 2.1. Parámetros más importantes a controlar en el ensayo de tracción.....	18
Tabla 2.2. Especificaciones de la máquina universal de ensayos para tracción.....	19
Tabla 2.3. Principales parámetros a controlar en el proceso de soldadura GTAW. ....	20
Tabla 2.4. Especificaciones de máquina eléctrica para soldadura GTAW.....	21
Tabla 2.5. Principales parámetros a controlar en el ensayo de doblez guiado. ....	22
Tabla 2.6. Especificaciones de máquina de ensayo de doblez guiado. ....	24
Tabla 2.7. Principales parámetros a controlar en el ensayo de corrosión.....	25
Tabla 2.8. Distribución de las muestras en el ensayo de corrosión. ....	28
Tabla 2.9. Especificaciones de los equipos utilizados en el ensayo de corrosión. ....	28
Tabla 2.10. Principales parámetros a controlar en las metalografías.....	30
Tabla 2.11. Especificaciones de los equipos utilizados en el análisis metalográfico.....	32
Tabla 2.12. Especificaciones del microdurómetro. ....	34
Tabla 2.13. Especificaciones del durómetro.....	36
Tabla 2.14. Especificaciones del espectrómetro de barrido electrónico.....	37
Tabla 3.1. Resultados del ensayo de tracción. ....	39
Tabla 3.2. Calor de entrada resultante en los pases del procedimiento de soldadura. ....	40
Tabla 3.3. Resultados de la variación de masa en las probetas expuestas a 30 días. ....	41
Tabla 3.4. Resultados de la variación de masa en las probetas expuestas a 90 días. ....	41
Tabla 3.5. Inicio y final de las probetas expuestas al proceso de corrosión. ....	42
Tabla 3.6. Velocidad de corrosión para probetas ensayadas 720 horas.....	44
Tabla 3.7. Velocidad de corrosión para probetas ensayadas 2160 horas. ....	44
Tabla 3.8. Análisis superficial de las probetas sin ataque químico. ....	45
Tabla 3.9. Análisis metalográfico de las probetas con ataque químico. ....	46
Tabla 3.10. Macrografías del cordón de soldadura. ....	48
Tabla 3.11. Resultados del porcentaje en peso obtenido mediante microscopía electrónica de barrido. ....	54

## **NOMENCLATURA**

MB Material base

ZAC Zona afectada por el calor

MA Material de aporte

ZF Zona de fusión

CCT Temperatura de corrosión de la grieta (Crevice Corrosion Temperature).

CPT Temperatura crítica de picadura (Critical Pitting Temperature).

GTAW Gas Tungsten Arc Welding.

C Carbón

Mn Manganeso

P Fósforo

Si Silicio

Ni Níquel

Cr Cromo

Mo Molibdeno

N Nitrógeno

Cu Cobre

Fe Hierro

6G Posición de soldadura con eje inclinado a 45 grados respecto a la horizontal

FCC Face center cubic

BCC Body center cubic

$\delta$  Ferrita delta

## RESUMEN

Esta investigación estudió los cambios presentados en la microestructura, características físicas y propiedades mecánicas de una tubería de acero inoxidable dúplex 2205 soldada mediante proceso GTAW, cuando es sometida a un proceso acelerado de corrosión bajo la aplicación de cargas constantes sobre las probetas, al ser un trabajo complementario se obtiene la soldadura a partir de un WPS ya generado. Las probetas sometidas al ensayo de corrosión, muestran cambios de coloración superficial y variación de masa, en la macrografías se evidenció las fases ferrítica y austenítica del acero en forma de granos alargados característico de un acero laminado en caliente, además en las micrografías se observó desprendimiento de material característico de la corrosión uniforme y corrosión por picadura, así como también la aparición de fases intermetálicas, inclusiones y nucleación del grano en forma de elipsoidales y de Windmástätten por efecto del calor generado en el proceso de soldadura. Otro aspecto analizado fue la dureza en HV y HRC, obteniendo valores por debajo de la norma ASTM A790, que presenta las especificaciones de los aceros inoxidables, resultados que demuestra que las propiedades mecánicas han sido afectadas por el proceso de corrosión. Por microscopía electrónica de barrido (SEM) se reveló la distribución de los aleantes presentes en un punto, demostrando la presencia de los elementos principales que componen al acero inoxidable dúplex.

**Palabras clave:** Austenita, corrosión, dúplex 2205, fases intermetálicas, ferrita, ZAC.

## ABSTRACT

This research studied the changes in the microstructure, physical characteristics and mechanical properties of the pipe duplex stainless steel 2205 welded by GTAW process, when subjected to an accelerated process of corrosion under the application of constant loads on the specimens, being a complementary work, the welding is obtained from an already generated WPS. The test pieces subjected to the corrosion test, show changes of coloration on its surface and variation of mass, in the macrographs is evident the ferritic and austenitic phases of the steel in form of elongated grains, characteristic of the steel hot rolled, addition in the micrographs is observe detachment of material characteristic of uniform corrosion and pitting corrosion, as well as the emergence of intermetallic phases, inclusions, and nucleation of the grain in ellipsoidal and Windmastatten forms by the heat generated in the welding process. Another aspect analyzed was the hardness in HV and HRC, obtaining values below the ASTM A790 standard, which presents the specifications of stainless steels, results that show that the mechanical properties were affected by the corrosion process. By scanning electron microscopy (SEM) is revealed the distribution of the alloys present in a point, demonstrating the presence of the primordial elements that make up the duplex stainless steel.

**Keywords:** Austenite, corrosion, duplex 2205, intermetallic phases, ferrite, ZAC.

# **“ESTUDIO Y ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL DEL PROCESO ACCELERADO DE CORROSIÓN PRESENTADO EN TUBERÍAS DE ACERO DÚPLEX 2205 SOLDADAS MEDIANTE PROCESO GTAW”**

## **INTRODUCCIÓN**

En el ámbito técnico profesional e industrial el presente trabajo de titulación, tiene por objetivo determinar las causas que acortan la vida útil del acero dúplex 2205, las propiedades mecánicas, así como la resistencia a la corrosión en un ambiente salino con presencia de iones cloruro.

Los aceros 2205 son materiales adaptables, que por sus características y propiedades forman parte importante dentro de los procesos industriales y continúan abriéndose campo con nuevas aplicaciones. La característica principal de éste acero es su resistencia a la corrosión frente a agentes oxidantes, debido a su microestructura (ferrita y austenita) y los elementos aleantes que lo componen, lo que le otorga mejores propiedades mecánicas que los aceros inoxidable austeníticos y ferríticos (Múnez, C.J., Utrilla, M.V., Ureña, A., y Otero, E., 2007).

La presente investigación radica en la problemática del proceso acelerado de corrosión presentado en tuberías de acero dúplex (DSS por sus siglas en inglés) 2205 soldada mediante proceso GTAW, lo cual demanda obtener una mejor comprensión de las posibles transformaciones microestructurales que pueden conducir a un proceso de corrosión acelerado.

Para analizar esta problemática es necesario mencionar sus causas, como son los entornos o medios de trabajo, tomando en cuenta que el acero 2205 puede sufrir corrosión, además el proceso de soldadura puede ocasionar alteraciones en la microestructura de las zonas aledañas al cordón de soldadura, así como en la zona donde se deposita el material de aporte.

El intenso calentamiento y rápidos ciclos de enfriamiento inherentes al proceso pueden estar afectando las propiedades mecánicas de la junta a tal punto de fallar en la zona afectada por el calor (ZAC).

La distribución del trabajo consta de los siguientes capítulos: capítulo uno suministra un acercamiento a las propiedades y características de los materiales que se usarán en este trabajo, el capítulo dos detalla los aspectos técnicos sobre equipos, procesos experimentales, parámetros y ensayos utilizados en esta investigación, el capítulo tres integra y recopila los resultados para contrastar y resaltar los hallazgos más importantes y finalmente el capítulo cuatro enumera las conclusiones más significativas adquiridas en el presente trabajo de titulación.

## **Objetivo general**

Estudiar y analizar la microestructura del proceso acelerado de corrosión presentado en tuberías de acero dúplex 2205 soldadas mediante el proceso GTAW.

## **Objetivos específicos**

- Establecer la influencia de los cambios o precursores del proceso de coloración superficial en las probetas de acero dúplex 2205, como indicadores de corrosión.
- Determinar el proceso de corrosión que presenta la tubería soldada en ambiente salino.
- Determinar los tipos de microestructura formados en el proceso de soldadura.

# 1. MARCO TEÓRICO

El presente capítulo desarrolla los fundamentos de la investigación, se da cita a los conceptos sobresalientes de aceros inoxidable dúplex, sus propiedades físico-mecánicas, los principales aleantes y la microestructura, adicional de los posibles procesos de daños que sufre el acero en su entorno de trabajo. Es de interés para ésta investigación describir conceptos de los diferentes tipos de corrosión, entornos corrosivos y entre otros temas de estudio para dar respuesta a los objetivos planteados.

## 1.1. Desarrollo histórico

La existencia de los aceros dúplex se remonta hace 80 años, siendo Francia el primer país en presentar la patente de éstos aceros otorgándoles el nombre de Uranus 50 Duplex Stainless Steel. El desarrollo del acero dúplex se divide en dos generaciones: la primera generación se caracteriza por presentar buenas propiedades mecánicas pero gran limitación en las uniones soldadas, la segunda generación presenta mejores aleaciones mediante el proceso de afino<sup>1</sup> por descarburación con argón y oxígeno incluyendo la adición deliberada de nitrógeno como elemento de aleación, obteniendo alta resistencia a la corrosión en la unión soldada por su aleación con nitrógeno, dándose a conocer con sus primeras aplicaciones en las plataformas de gas del Mar de norte y campos petrolíferos. Para la actualidad el mercado ofrece una amplia gama de aceros, clasificados en grupos como muestra la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Clasificación y descripción de los aceros inoxidables.

Aceros inoxidables	Descripción	Ejemplos
Ferríticos	Fe+Cr(10,5-30%)+C(0,015-0,08%)	AISI-430, AISI-444, AISI-316
	Microestructura ferrítica	
Austeníticos	Fe+Cr(16-28%)+Ni(6-32%)+C(0,02-0,1%)	AISI-304, AISI-316, AISI-317
	Microestructura austenítica	
Martensíticos	Fe+Cr(12-19%)+C(0,08-1,2%)	AISI-410, AISI-420, AISI-431
	Microestructura martensítica	
Dúplex	Fe+Cr(22-265%)+Ni(4-7%)+C(<0,08%)+Mo(3-4%)	Dúplex 2304 Dúplex 2205
	Microestructura ferrítica y austenítica	
Endurecidos por precipitación	Acero inoxidable del Cr-Ni con otros elementos de aleación como el cobre y aluminio	UR-50 UR-45N

(Fuente: Szyndelman, 2008)

<sup>1</sup> Proceso de eliminación de impurezas

El acero inoxidable dúplex 2205 fue el punto de partida de los tipos dúplex de segunda generación, entrando en auge por sus excelentes propiedades mecánicas, reducción en el peso y variedad de aplicaciones.

## 1.2. Acero inoxidable dúplex 2205

Tiene varias nomenclaturas como se observa en la Tabla 1.2.; con respecto a sus fases se lo denomina Ferrítico-Austenítico por mostrar una microestructura mixta de granos finos de fracción volumétrica equivalente (50/50), además presentan propiedades mecánicas y anticorrosivas superiores a las de los aceros monofásicos por lo que tienen gran demanda en las industrias de petróleo, gas y petroquímica.

Tabla 1.2. Equivalencias entre nomenclaturas del acero dúplex 2205.

Nombre Común	Nombre químico	DIN	UK-BSI	USA-UNS ASTM-A276	AISI A182
7 – Mo PLUS <sup>2</sup> Aleación 2205 (S31803) FERRALIUM 255 <sup>3</sup>	X2CrNiMoN22-5-3	Dúplex 2205	1.4462	S31803 S32205	F51 (329LN) /F60

(Fuente: Gunn, 1997)

Su temperatura ideal de trabajo está entre  $-50$  a  $250^{\circ}\text{C}$ , a temperaturas menores el acero adopta un carácter frágil en la fase ferrita y a temperaturas mayores adquiere mayor resistencia ocasionando que el acero sea más frágil (Quintero, 2002). Su principal característica es su buena soldabilidad a causa del bajo contenido de carbono y nitrógeno que sustituye al níquel parcialmente sin afectar sus propiedades mecánicas o anticorrosivas, otorgando al acero alta resistencia anticorrosiva en medios ácidos y en presencia del ion cloro ( $\text{Cl}^-$ ).

### 1.2.1. Composición química

Se presenta en la norma ASTM A790 descrita en el ANEXO I, que indica los rangos permitidos de variabilidad del porcentaje en peso de cada aleante, para que el acero presente propiedades físicas y mecánicas ideales en sus aplicaciones, ya que éstas dependen de los porcentajes de los aleantes, es el caso de Quintero (2002) que menciona los efectos que tienen cada aleante en el acero.

<sup>2</sup> 7-MO PLUS es una marca de Carpenter Technology Corporation

<sup>3</sup> FERRALIUM es la marca de Langley Alloys Ltd.

- **Nitrógeno (N)**

Es el más representativo para el rendimiento de corrosión localizado en los aceros inoxidable, cuando tiene un porcentaje en peso de 0,2% a 0,3%, mejorando de manera directa la ductilidad y la tenacidad.

- **Cromo (Cr)**

De este aleante depende la formación de la capa pasiva del acero inoxidable en soluciones de cloruro, debido que al aumentar el contenido de cromo se expande el rango de potencial pasivo. El mayor contenido de cromo estabiliza la ferrita y puede equilibrarse con un aumento de níquel para mantener la proporción correcta de las fases en la microestructura, pero si excede el límite máximo podría provocar la formación de la fase sigma ocasionando la reducción de la dureza, ductilidad y propiedades de corrosión de la aleación.

- **Molibdeno (Mo)**

Influye favorablemente sobre el rango del potencial pasivo, mejora la resistencia a la corrosión general, corrosión en grietas en soluciones de cloruro ( $Mo > 3\%$ ) y corrosión por picaduras. El nivel máximo de molibdeno que se puede agregar en los aceros inoxidables dúplex se limita alrededor del 4% en peso, ya que la adición de dicho aleante amplía el campo de fase sigma ( $\sigma$ ) y la fase chi ( $\chi$ ), reduciendo la ductilidad y tenacidad en el acero inoxidable.

- **Níquel (Ni)**

Aumenta la resistencia a la corrosión por picadura, su peso debe mantenerse entre 4 a 8% para aleaciones de 25% de cromo y de 4 a 7% para aleaciones con 22% de cromo. Si el contenido de níquel es superior al óptimo aumentará notablemente la austenita por encima del 50%, y la ferrita se transformará más fácilmente a la fase sigma frágil afectando negativamente las características de trabajo en caliente de los aceros forjados como la resistencia al impacto, la ductilidad y la soldabilidad, por el contrario, si el contenido de níquel se reduce por debajo del nivel óptimo da lugar a contenidos de ferrita altos obteniendo disminución en la tenacidad.

- **Silicio (Si)**

En contenidos mayores al 1% en peso da lugar a la formación de la fase sigma, lo cual conduce a una resistencia a la corrosión menor en el acero inoxidable.

- **Carbono (C)**

El contenido se limita a 0,030% en peso, garantizando que sea trabajable en caliente, las bajas concentraciones de carbono evitan las precipitaciones de carburo y reducen la aparición de corrosión localizada en la soldadura.

## **1.2.2. Fases secundarias en los aceros inoxidables dúplex**

Por la aplicación de tratamientos térmicos o procedimientos de soldadura pueden dar cabida a fases secundarias no deseadas, cuando el acero es sometido a algún tipo de proceso que demande altas temperaturas en el intervalo de 550 a 1500°C. Estas fases son citadas por Álvarez-Armas y Degallaix-Moreuil (2013), que indican su influencia y el efecto que tienen sobre las propiedades del acero, y que se citan a continuación:

### **Fase alfa prima ( $\alpha'$ )**

Es la fase más propensa a desarrollarse, ya que aparece cuando el material es trabajado a temperaturas de entre 300 a 525°C, siendo esta fase la causante del endurecimiento y fragilidad en los aceros inoxidables ferríticos. Ésta se puede formar por nucleación y/o crecimiento de grano en aceros con alto contenido de cromo.

### **Fase sigma ( $\sigma$ )**

Es la más perjudicial de las fases secundarias por influir negativamente en la resistencia a la corrosión y la tenacidad del acero, se presenta en un intervalo de temperatura de 550 a 900°C, precipitándose generalmente en los límites de grano ferrita/austenita y en las uniones triples, desarrollándose hacia el interior de los granos de ferrita.

Esta fase se presenta en forma de granos alargados y orientados en la dirección de laminación, en la transformación de fase ferrítica a fase sigma, la ferrita se empobrece de elementos alfégenos<sup>4</sup> (Cr, W, Mo) resultando en la desestabilización para transformarse en austenita secundaria.

### **Austenita secundaria ( $\gamma_2$ )**

Se presenta a temperaturas mayores a 650°C, cuando a causa de la difusión la ferrita es transformada en austenita, dando lugar a precipitados de austenita en los límites de grano, resultando en la pérdida de cromo y quedando como zona preferencial para el ataque por picadura.

---

<sup>4</sup> Elementos estabilizadores de la austenita

### **Fase chi ( $\chi$ )**

Aparece cuando el material ha sido expuesto a tiempos prolongados de enfriamiento, cuando éste haya estado a temperaturas entre 700 a 900°C, ocasionando efectos negativos sobre la tenacidad y las propiedades anticorrosivas en menor grado que la fase sigma.

### **Fases R, Pi ( $\pi$ ) y Tau ( $\tau$ )**

Fase hojas o fase R ( $Fe_2Mo$ ), precipita en pequeñas cantidades a temperaturas entre 550 a 650°C después de varias horas de exposición. Se forman en sitios inter e intragranulares reduciendo la resistencia a la corrosión por picaduras. El  $\pi$ -nitruro se posiciona en sitios intragranulares en el metal de aporte, posterior al tratamiento térmico a 600 °C por varias horas. La fase  $\tau$  se presenta en forma de agujas en los límites  $\delta/\delta$  durante el tratamiento térmico entre 550 a 650 °C.

### **Nitruro de $Cr_2N$ y $CrN$**

La solubilidad del nitrógeno en la ferrita es alta a temperaturas aproximadas de 1000°C y al enfriarse disminuye y se sobresatura conduciendo a la precipitación intragranular de  $Cr_2N$  en forma de aguja, de manera similar la formación de otro nitruro en la ZAC es el  $CrN$  de forma cúbica. Estas fases aparecen en los límites de  $\delta/\delta$ , puntos triples, inclusiones y a lo largo de las matrices de dislocación.

### **Carburo $M_{23}C_6$ y $M_7C_3$**

Para los grados dúplex con niveles de carbono de aproximadamente 0.03%, el carburo  $M_{23}C_6$  precipita entre 650 a 950°C, requiriendo menos de un minuto para formarse, y aparecen principalmente en los límites  $\delta/\gamma$  además de  $\delta/\delta$  y  $\gamma/\gamma$ .

De las fases mencionadas, la fase sigma ( $\sigma$ ) tiene mayor influencia en la tenacidad y en la corrosión de los aceros inoxidable, siendo la fase más perjudicial y por ende la más importante para análisis. En la industria es frecuente y habitual hacer referencia y/o llamar a todas las fases intermetálicas como fase sigma (sin importar la fase que se haya suscitado) a razón que todas las fases son perjudiciales.

### 1.2.3. Propiedades físicas y mecánicas

Las aleaciones dúplex son apropiadas para ciclos térmicos de trabajo a causa de su bajo coeficiente de expansión térmica, y en comparación a los grados austeníticos éstos presentan un alto nivel de conductividad térmica que combinado con su resistencia mecánica dan la posibilidad a producir materiales con paredes delgadas para varias aplicaciones, las propiedades físicas y mecánicas se muestran en la norma ASTM A790 en el ANEXO I.

Además, para aplicaciones bajo carga se necesita conocer la capacidad del material a resistir fuerzas y esfuerzos sin romperse y el límite antes de adquirir deformaciones permanentes o variables, estos valores se representan en el diagrama esfuerzo-deformación indicada en la Figura 1.1. junto a curvas de otros aceros comerciales.

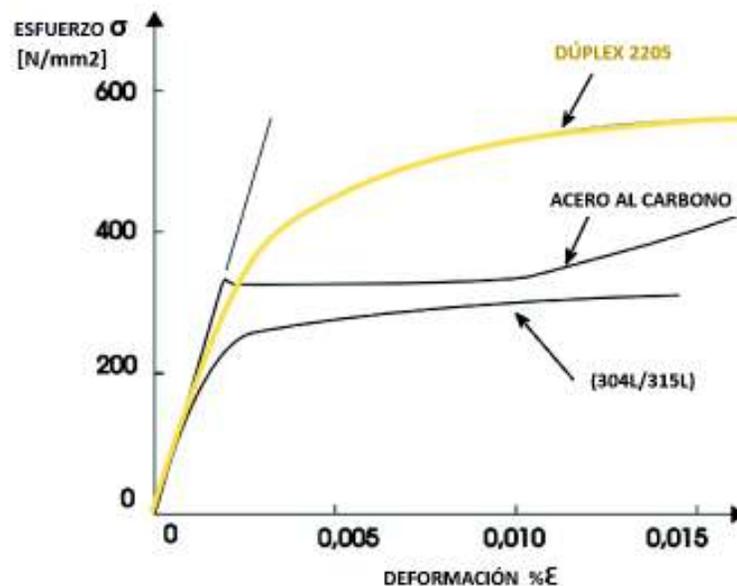


Figura 1.1. Curvas de esfuerzo-deformación de aceros inoxidables sobresalientes en el mercado.

(Fuente: ITEA, s.f.)

### 1.2.4. Resistencia a la corrosión

Los aceros inoxidables presentan altos valores de resistencia a la corrosión debido a la formación de una película pasiva, presentándose en entornos oxidantes cuando el acero presenta valores de cromo mayores al 12%, además esta capa tiene la capacidad de restaurarse por oxidación, pero existen ambientes en los que la ruptura no se puede reparar desencadenando en una posible corrosión. En los aceros inoxidables las fases pueden generar un ataque preferencial en la fase más débil, y cuando la capa pasiva sufre una descomposición local se puede producir la corrosión por picadura (APERAM, 2013).

## 1.2.5. Microestructura

Los aceros inoxidable dúplex se caracterizan por presentar microestructura bifásica en cantidades aproximadamente iguales de austenita gamma ( $\gamma$ ) con estructura atómica fcc (de 40% a 50%) y ferrita alfa ( $\alpha$ ) con estructura atómica bcc (de 50% a 60%), en la Figura 1.2. se muestra la microestructura original del material, tanto de productos colados como forjados, identificando así la existencia de dos fases, ferrita (zona oscura) y austenita (zona clara) (Garin, Mannheim, & Camus, 2010).

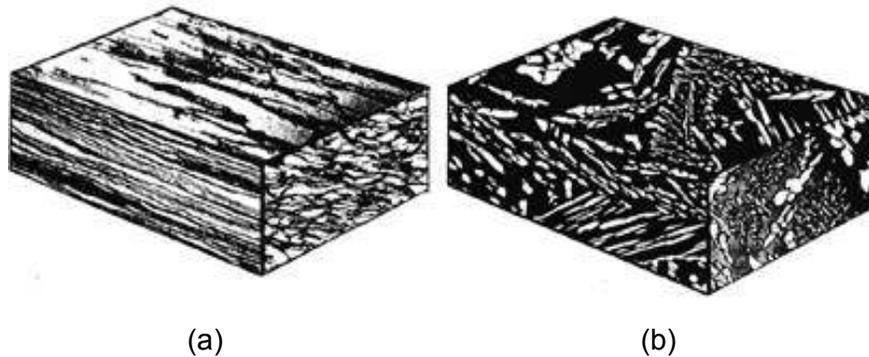


Figura 1.2. Microestructura del acero inoxidable dúplex 2205 de a) acero laminado en caliente y b) acero fundido.

(Fuente: Gunn, 1997)

## 1.3. Proceso GTAW

El proceso de soldadura por arco de tungsteno a gas (GTAW-Gas Tungsten Arc Welding) también conocido como soldadura de gas inerte de tungsteno (TIG-Tungsten Inert Gas) es un proceso que produce coalescencia<sup>5</sup> de metales al calentarlos con un arco que se forma entre un alambre de tungsteno no consumible y las piezas de trabajo a unir, siendo protegido de la contaminación atmosférica por el gas de protección que generalmente es argón (Ar) o helio (He), que facilita el control de adición de calor para obtener resultados de calidad con baja distorsión y sin picadura.

### 1.3.1. Gas de protección argón

Su uso es más común en comparación al helio; es incoloro, insaboro, no es inflamable, ni tóxico, tiene la característica de ser física y químicamente estable, y debe tener una pureza mínima del 99.98%.

---

<sup>5</sup> Propiedad que presenta el material a unirse o fundirse

Es utilizado para la protección de la soldadura en procesos MIG, TIG y plasma, protegiendo la pila del metal líquido de la atmósfera; su flujo debe ser controlado, si el flujo es lento no protegerá adecuadamente el baño de soldadura, en cambio sí este flujo es excesivo la soldadura puede aspirar aire en dicha región. Algunas de las ventajas, mencionadas por Fulcer (2008) en comparación a otros gases similares son:

- Arranque de arco más fácil, suave y silencioso.
- Posibilidad de reducir el voltaje debajo del mínimo para metales delgados.
- Más disponibilidad a menor costo.

#### 1.4. Varilla de aporte ER2209 3/32

La varilla ER2209 AWS-A5.9/ASME-SFA5.9 es utilizada para soldar aceros inoxidable dúplex de 22%Cr/5%Ni con proceso TIG (Avesta, 2013), posee propiedades similares al material base ofreciendo resistencia a la corrosión por picadura en una amplia gama de entornos, por ejemplo, ambientes de cloruro (agua de mar). En el ANEXO II se presenta la hoja técnica de la varilla de aporte.

#### 1.5. Tipos de corrosión

La mayor parte de los metales tienen la tendencia de regresar a su estado estable o estado original, es decir su forma de óxido, la corrosión del metal es esencialmente una reacción electroquímica en la interfaz entre el metal y el entorno. La composición porcentual en peso de la aleación conduce a los aceros inoxidable a variar su comportamiento de corrosión, especialmente en ambientes donde acontecen la corrosión general. En la Figura 1.3 se presenta el análisis porcentual de los tipos de corrosión encontrados en aplicaciones industriales.

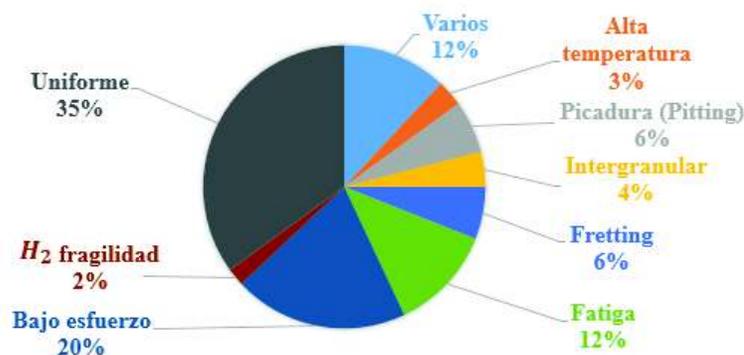


Figura 1.3. Análisis porcentual de los tipos de corrosión presentes en las aplicaciones industriales.

(Fuente: Álvarez-Armas I., y Degallaix -Moreuil,S, 2013)

A continuación, se analiza los procesos de corrosión más comunes de los aceros y su respectiva representación se muestra en la Figura 1.4.

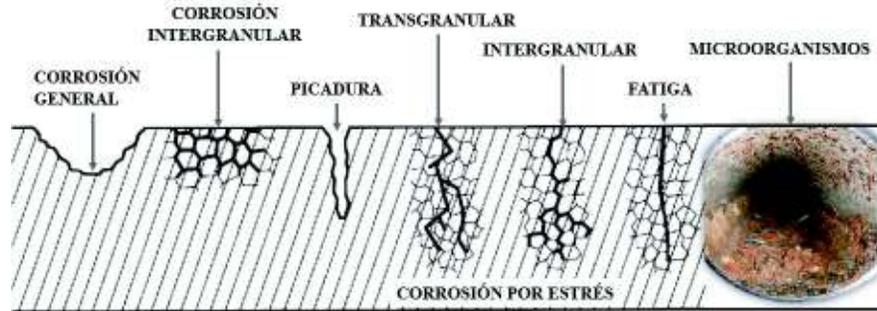


Figura 1.4. Tipos de corrosión originados en los metales.

(Fuente: Propia,2018)

### 1.5.1. Corrosión general

Es la pérdida uniforme de peso ocasionada por el desprendimiento de material que afecta a la superficie y no es apreciable a simple vista. Cuando la composición química del acero es pobre en aleantes estabilizadores de la capa de pasividad o el entorno es hostil, ocasiona el descenso de la resistencia a la corrosión, dejando expuesta la superficie del metal al ataque corrosivo del entorno que lo rodea, ésta forma de corrosión no es común en los aceros inoxidable (APV, 2008).

### 1.5.2. Corrosión intergranular

Este proceso tiene lugar cuando el material se calienta entre 425 a 815 °C o es enfriado bruscamente desde temperaturas superiores a 1035°C, pues los carburos de cromo se precipitan en el borde de grano, quedando las zonas adyacentes desprovistas de cromo, propagando la sensibilización y por ende la corrosión (Avesta, 2013).

### 1.5.3. Ataque por picadura (Pitting)

Es un proceso electroquímico de oxidación-reducción que tiene lugar en la superficie de los metales, a causa de un electrolito rico en cloruro y/o sulfuro ocasionando una ruptura local en la capa pasiva del acero, si dicha capa no vuelve a pasivarse la corrosión se desarrollará y el acero quedará desprotegido, dando lugar a que el entorno hostil al que se encuentre expuesto el material evite la repasivación de la superficie del mismo, como se muestra en la Figura 1.5.

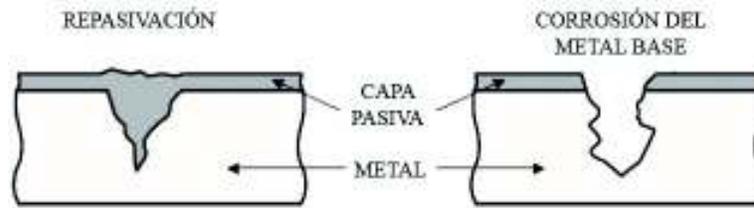


Figura 1.5. Proceso de repasivación en un metal con picadura.

(Fuente: Aperam, 2013)

Esta disolución da como resultados la aparición de iones metálicos y electrones en la zona desprovista de la capa pasiva y así el paso de la corriente (de disolución) dando lugar a una diferencia de potencial eléctrico entre la zona anódica (picaduras) y la zona catódica (el resto del metal).

Si el potencial del acero inoxidable en el medio dado es inferior al potencial de picadura, la corrosión no dará inicio, caso contrario el acero se corroe (Aperam, 2013).

Para este tipo de corrosión se establece la fórmula matemática que describe la relación entre la cantidad de los principales elementos de la aleación y la resistencia a la corrosión del acero inoxidable denominada PREN (Pitting resistance equivalent number) mostrada en la Ecuación 1.1, y mediante ésta se clasifican los aceros inoxidables como se indica en la Figura 1.6.

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

Ecuación 1.1

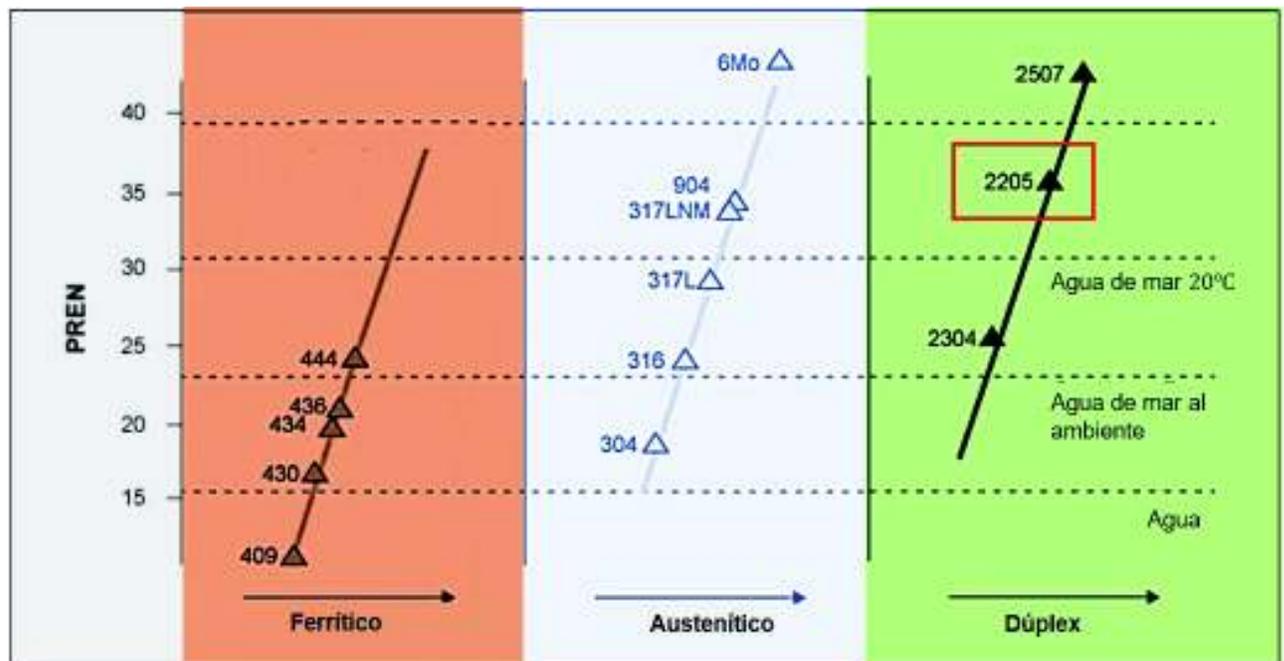


Figura 1.6. Valor del PREN para aceros dúplex más populares en el mercado.

(Fuente: Ramírez, 2006)

### 1.5.3.1. Pasividad

De acuerdo con la norma ASTM G15-08 (Standard Terminology Relating to Corrosion and Corrosion Testing), es una fina capa de 2,00 a 4,00 [nm] presente en la superficie de los aceros inoxidable formada por óxido de cromo, protegiendo al material de la corrosión por picadura, como lo muestra la Figura 1.7, esta película es considerada insoluble y autosellante, es decir, se formará nuevamente cuando haya sido dañada ante un medio oxidante. Las picaduras pueden tomar formas irregulares, las cuales se clasifican de acuerdo a la norma ASTM G46 (ANEXO III).

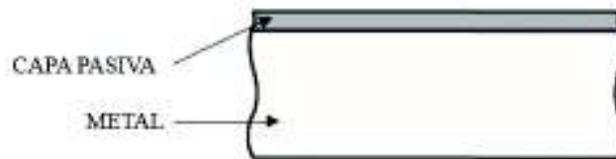


Figura 1.7. Capa o película protectora superficial de los aceros inoxidables.

Fuente: (APERAM, 2013)

### 1.5.4. Corrosión por tensión

La corrosión bajo tensión como lo indica la norma ASTM G36 – 94 (Standard Practice for Evaluating Stress-Corrosion-Cracking Resistance of Metals and Alloys in a Boiling Magnesium Chloride Solution), requiere la aplicación simultánea de tensiones de tracción y de condiciones ambientales controladas.

Las fuerzas no necesitan ser mayores a las de tensión de prueba, sólo mantener el efecto de una carga constante como suele tener los aceros al ser soldados o doblados. La morfología de este tipo de corrosión es una fina grieta filamentososa que se propaga a través del metal en modo transgranular que generalmente se ramifica, caso contrario sólo asume una forma única de grieta. La propagación de la grieta es interna por lo que es imposible repararla con soldadura y es recomendable eliminar el área afectada y reemplazar dicha sección. Para HILTI (2015) existe tres requisitos iniciales para que se produzca la corrosión por tensión, como son:

- Esfuerzo de tensión: estrés residual de fabricación.
- Especies corrosivas: compuestos iónicos que actúan como corroyentes.
- Temperatura: superior a los 60°C.

### **1.5.5. Corrosión por microorganismos**

La corrosión también puede ser influenciada por la actividad de microorganismos tales como esporas o células bacterianas de hongos que pueden estar en el agua o fluido de trabajo y entran en contacto directo con la suciedad, glóbulos grasos y polvo para formar películas biológicas que entran en contacto con el material, dando lugar a la biocorrosión o corrosión ocasionada por microorganismos (Microbial Influenced Corrosion).

Los microorganismos formados en la superficie de los metales pueden modificar la composición química de las capas protectoras, dando lugar a una corrosión acelerada, la cual no es originada por nuevos mecanismos electroquímicos, sino por el cambio generado por organismos que mantienen reacciones fisicoquímicas que pueden no ser favorables para el material en el entorno al cual esté expuesto (Santander, 2008).

Los aceros inoxidable tienen buena resistencia a la corrosión, sin embargo, son propensos a deteriorarse por los microorganismos presentes en el entorno de trabajo, datos estadísticos demuestran que cerca del 20% del daño anual de corrosión en aceros son resultado de la participación de bacterias sobre la superficie del material, la de mayor influencia es la denominada corrosión anaeróbica<sup>6</sup> influenciada por bacterias sulfato reductoras y corrosión aeróbica por bacterias de hierro oxidantes (Santander. 2008).

Los microorganismos causantes de la corrosión biológica pueden clasificarse en aeróbicos (crecen en presencia de oxígeno), o anaeróbicos (crecen más favorablemente en ausencia o con poco oxígeno).

### **1.6. Corrosión en entornos específicos**

Los entornos hostiles a los que se encuentra expuesto el acero son los campos donde desarrolla su trabajo, en APV (2008) se considera como medioambientes los siguientes:

- No corrosivos, leve y altamente corrosivos.
- Detergentes alcalinos y agentes desinfectantes.
- Fluidos de servicio.

---

<sup>6</sup> Bacterias que no necesitan oxígeno para vivir

### **1.6.1.Fluido de servicio (agua de mar)**

De la calidad del agua dependen las especies, componentes químicos, partículas contenidas, cantidad de cloro y pH que son factores propicios para dar inicio al proceso de corrosión (HILTI, 2015). Los sistemas de agua de mar son de uso múltiple para las industrias marítimas, petroleras, plantas de energía e industrias costeras, siendo el agua de mar utilizada como refrigerante, para Pierre (2000) los factores más importantes a considerar del agua de mar son:

- Alta concentración de sal (cloruro de sodio).
- Alta conductividad eléctrica.
- pH relativamente alto y constante.
- La presencia de una miríada de compuestos orgánicos.
- La existencia de la vida biológica (por ejemplo, las bacterias) y macrodepósitos (por ejemplo, algas marinas, mejillones, percebes y otros tipos).

### **1.6.2.Resistencia a la corrosión de los materiales**

La resistencia que ofrece los materiales no depende únicamente de su composición química, sino también de los diferentes factores que presente el agua de mar, como son:

- **Ion de cloruro**

Es altamente corrosivo para aceros al carbono y metales ferrosos, debido a que éstos no se pueden pasivar.

- **Movimiento del fluido**

La tasa de corrosión aumenta cuando el flujo es turbulento, debido a que el agua de mar en movimiento puede destruir la barrera de la herrumbre y proporcionar más oxígeno. El flujo tiende a promover una penetración rápida y ocasionar daño por cavitación exponiendo la superficie del acero a mayor corrosión.

- **Temperatura**

El aumento de la temperatura ambiente tiende a acelerar el ataque, mientras que en el agua de mar puede depositar escamas protectoras o perder su oxígeno, una o ambas acciones tienden a reducir el ataque.

- **Biofouling**

Las incrustaciones de animales de caparazón duro (microorganismos, plantas, algas o animales) que tienden a reducir el ataque al restringir el acceso de oxígeno, pero en algunos casos las bacterias pueden participar en la reacción de corrosión.

- **Contaminación**

Los sulfuros, que normalmente están presentes en el agua de mar contaminada, aceleran enormemente su fijación al acero, sin embargo, el bajo contenido de oxígeno podría favorecer la reducción de la corrosión.

- **Limo y Suspendido**

La erosión de la superficie del acero por la materia suspendida aumenta en gran medida la tendencia a corroerse por la formación de una película. También está el caso que se forme óxido y escamas minerales (sales de calcio y magnesio), interfiriendo con la difusión de oxígeno a la superficie del cátodo.

- **Oxígeno:**

La corrosión del acero en su mayor parte es controlada catódicamente. El oxígeno, al despolarizar el cátodo, facilita el ataque, por lo tanto, un alto contenido aumenta la corrosividad.

- **Estrés**

Las cargas cíclicas pueden acelerar la falla de un componente mecánico de acero corroído y pueden promover fallas en situaciones especiales.

## **1.7. Resistencia a la corrosión de los materiales**

Las propiedades de un material se ponen a prueba cuando se encuentran bajo condiciones reales, los tiempos que demanda realizar estas pruebas son prolongados por lo que se opta utilizar ensayos bajo condiciones controladas o de laboratorio.

Los principales objetivos de la corrosión acelerada son: obtener información sobre el comportamiento a la corrosión de un material en un ambiente o entorno específico, realizar un control de calidad sobre el material, predecir la vida útil de trabajo y simular cargas y mecanismos que estimulen la degradación.

Los parámetros que se deben controlar, según Uhlig (2011), en las pruebas de corrosión acelerada son:

- Aspecto visual de la materia prima al inicio y final de la prueba para observar los productos de corrosión indeseables.
- Pérdida o aumento de peso.
- Tasa de corrosión (mm/año, mpa, A/mm<sup>2</sup>).
- Profundidad y densidad de la picadura.
- Concentración de iones metálicos en solución.
- Consumo de oxígeno disuelto en electrolito local o a granel cambio de pH del electrolito local o masivo.
- Propiedades mecánicas o físicas (resistencia a la tracción, conductividad eléctrica, tenacidad, etc.).
- Parámetros electroquímicos (potencial de corrosión, densidad de corriente, potencial de Flade, etc.).

El proceso acelerado de corrosión que ocurre durante una prueba bajo condiciones controladas puede aportar con estimaciones razonables, parámetros cuantitativos y cualitativos de la corrosión frente a un entorno de servicio.

## 2. METODOLOGÍA

En el presente trabajo de investigación, se utiliza la cámara de niebla salina para aproximar las condiciones ambientales a las que se encuentra el material en servicio, para esto se recibe una tubería de acero inoxidable dúplex comercial del tipo 2205 de diámetro cuatro pulgadas, espesor seis milímetros, longitud aproximada de 0,55 metros y designación NPS 3 (1/2) como se especifica en el ANEXO I.

Para analizar el comportamiento mecánico se realizarán ensayos de tracción, doblado (de cara y de raíz) y dureza, los cuales permitirán cuantificar las propiedades mecánicas del acero inoxidable dúplex soldado mediante proceso GTAW. Para determinar la presencia en porcentaje de los principales aleantes del material base se realizará la microscopía electrónica de barrido EDS. Y finalmente se evaluará con ensayos metalográficos (macro y micrografía) la evolución de la corrosión.

### 2.1. Ensayo de tracción

Es un ensayo destructivo que muestra el comportamiento del material cuando se lo somete a una carga de estiramiento hasta conseguir su ruptura. Este proceso permite conocer las propiedades mecánicas del material, tales como: resistencia a la fluencia, resistencia a la tracción, carga máxima registrada y porcentaje de elongación, que serán comparadas con valores de la norma ASTM A790 para validar al material base. Los principales parámetros están detallados en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Parámetros más importantes a controlar en el ensayo de tracción.

Parámetro	Indicación	Norma
Dimensiones probeta	Largo y ancho	ASTM E8/E8 m-16a
Fuerza de tracción	Controlada en el proceso	
Puntos de referencia	Control al iniciar y finalizar proceso	
Equipo	Sujeción de mordazas	

(Fuente: Propia, 2018)

#### 2.1.1. Probetas de ensayo de tracción

Este ensayo se realizará al material base, se efectuará el corte de la tubería para obtener probetas que serán mecanizadas y luego fresadas, se tomará en cuenta el enfriamiento adecuado para evitar cambios en las propiedades mecánicas del material.

Se realizarán tres probetas bajo la norma ASTM E8/E8m (Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials), sus dimensiones se presentada en la Figura 2.1.

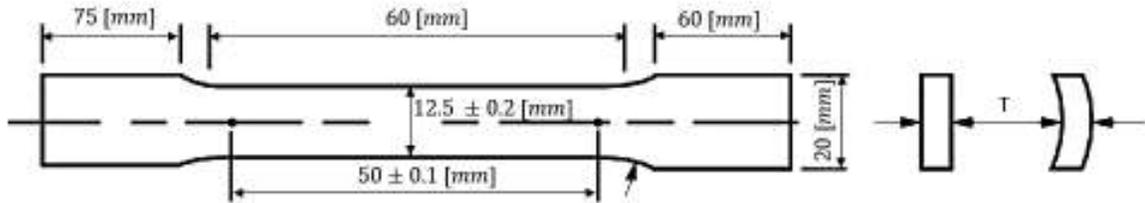


Figura 2.1. Dimensiones de probeta de tracción.

(Fuente: ASTM E8/E8M-09, 2009)

### 2.1.2. Equipo de ensayo de tracción

El ensayo se realizará en el laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones (LAEV) de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional. Se hace uso de un calibrador pie de rey para dimensionar la probeta, un marcador metálico y la máquina universal de ensayos con características especificadas en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Especificaciones de la máquina universal de ensayos para tracción.

Descripción	Especificación	Imagen
<b>Marca:</b>	TINIUS OLSEN (UNIVERSAL TESTING)	
<b>Modelo:</b>	SUPER L	
<b>Capacidad de carga:</b>	3000 [kN]	
<b>Aplicación de carga:</b>	Sistema Hidráulico	

(Fuente: Propia, 2018)

### 2.2.3. Procedimiento de ensayo de tracción

- Preparar las probetas bajo la norma ASTM E8, y posterior marcar puntos de referencia para valorar la elongación final.
- Colocar la probeta de forma vertical en la máquina universal de ensayos, verificando que sus extremos estén correctamente asegurados entre las mordazas.

- Ingresar los parámetros necesarios para controlar el proceso, y aplicar la fuerza exterior en uno de los extremos de la probeta a una velocidad constante.
- Después que la probeta se fracture se registrará los datos obtenidos por el software del equipo.
- Retirar la probeta ensayada de la máquina para tomar medidas finales del largo y ancho, y analizar la zona de fractura.

## 2.2. Proceso de soldadura GTAW

La presente investigación es complementaria del “Estudio y caracterización microestructural de la soldadura realizada mediante el proceso GTAW en tuberías de acero dúplex 2205 en posición 6G” (Jaramillo & Martínez, 2017) de la cual se obtiene el WPS a seguir el cual se especifica en el ANEXO IV, los principales parámetros se detallan en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Principales parámetros a controlar en el proceso de soldadura GTAW.

Parámetro	Indicación	Norma
Corriente de soldadura Voltaje de arco Composición de gas de protección Posición de junta a soldar	WPS	ANSI Z49.1
Superficie a soldar	Registro de corte y bisel en frío	

(Fuente: Propia, 2018)

Una vez efectuada la soldadura, se realizará un control de entrada de calor para determinar su influencia en posibles procesos de distorsión, contracción lateral y/o cualquier tendencia de fases perjudiciales resultantes de la soldadura, ya que todos estos casos pueden perjudicar la capacidad de servicio de la estructura soldada. La Ecuación 2.1. se usa para cuantificar la entrada de calor y comparar con valores de calor recomendados, que están determinados en manuales de soldadura (Avesta, 2013).

$$Q_{in} = \frac{U \cdot I}{V \cdot 1000} \quad \text{Ecuación 2.1.}$$

Donde:

$Q_{in}$ : corriente de entrada  $\left[ \frac{kJ}{mm} \right]$

I: corriente [A]

U: voltaje [V]

V: velocidad de pase  $\left[\frac{mm}{s}\right]$

### 2.2.1. Probetas para la soldadura

Se corta dos anillos de longitud 250 [mm], y en los bordes a solar se realiza una junta de acuerdo al código ASME sección IX, mediante procesos de mecanizado, esmerilado y rectificado se da forma del bisel en V que se representa en la Figura 2.2.

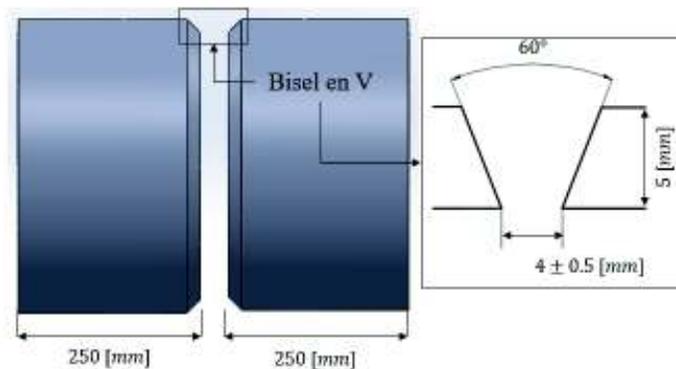


Figura 2.2. Dimensiones del bisel en V realizado en la tubería.

(Fuente: Propia, 2018)

### 2.2.2. Equipos para soldadura

El proceso de lleva a cabo en el Laboratorio de Soldadura de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional. El equipo empleado es una soldadora eléctrica para proceso GTAW, con especificaciones detalladas en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Especificaciones de máquina eléctrica para soldadura GTAW.

Descripción	Especificación	Imagen
<b>Marca:</b>	LINCOLN ARC SQUARE WAVE TIG 255	
<b>Proceso:</b>	GTAW	
<b>Voltaje:</b>	10 - 32 [V]	
<b>Amperaje:</b>	5 - 315 [A]	
<b>Código:</b>	10022	
<b>Potencia:</b>	1 Ph (60 Hz)	

(Fuente: Propia, 2018)

### 2.2.3. Procedimiento para la soldadura

- Realizar la preparación del bisel de acuerdo al WPS.
- Realizar tres puntos de suelda entre las tuberías a soldar para definir la abertura de la raíz y posición 6G de soldadura.
- Sellar los extremos de la tubería con cinta resistente a alta temperatura para purgar el interior del tubo con gas argón.
- Fijar y controlar los parámetros como lo describe el WPS y efectuar el proceso, permitiendo un tiempo entre cada pase de soldadura.
- Limpiar el cordón de soldadura como defina el WPS.

### 2.3. Ensayo de doblez guiado

Consiste en aplicar una fuerza constante en la soldadura de las probetas doblándolas en forma de U, proporcionando un control de calidad que permite determinar la ductilidad de la soldadura, maleabilidad del material de aporte, eficacia del proceso e inclusive la habilidad del operario, por lo cual se utiliza para realizar la calificación del procedimiento de soldadura. Los principales parámetros a controlar se detallan en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Principales parámetros a controlar en el ensayo de doblez guiado.

Parámetro	Indicación	Norma
Dimensiones probeta	Largo y ancho	ASME sección IX
Fuerza del apoyo móvil	Carga (80 psi)	
Superficie de la probeta	Se prepara previamente	ASME sección IX
Equipo de doblado guiado	Luz entre los apoyos estáticos	

(Fuente: Propia, 2018)

El ensayo permite realizar tres tipos de dobleces: de cara, de raíz y lateral, dependiendo cual se vaya a analizar se colocará como indica la Figura 2.3., la muestra se inspecciona visualmente, verificando la aparición de grietas u otras irregularidades superficiales presentadas durante el proceso que serán calificadas mediante el código ASME sección IX para la aprobación de la soldadura.

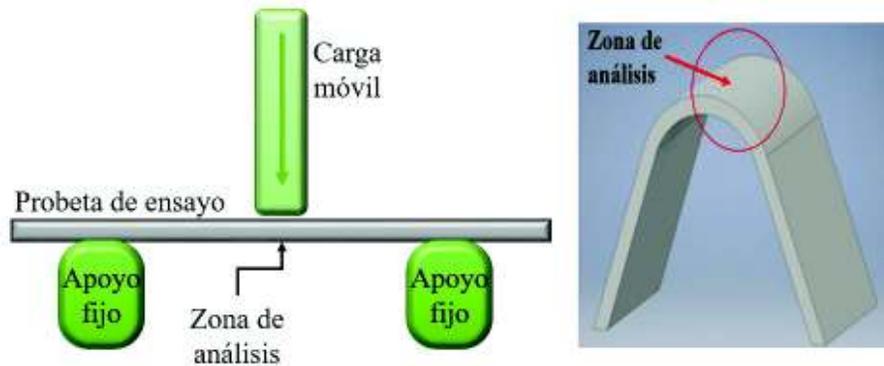


Figura 2.3. Procesos de doblez guiado y zona de análisis.

(Fuente: Propia, 2018)

### 2.3.1. Dobleza transversal de cara

Este ensayo analiza el área donde la soldadura es transversal al eje longitudinal del espécimen, el cual es doblado de modo que la superficie de raíz se vuelve la superficie convexa del espécimen doblado, procedimiento que se realiza bajo el código ASME sección IX en el subíndice QW 161.2.

### 2.3.2. Dobleza transversal de raíz

Este ensayo analiza el área donde la soldadura es transversal al eje longitudinal del espécimen, el cual es doblado de modo que la superficie de cara se vuelve la superficie convexa del espécimen doblado, procedimiento que se realiza bajo el código ASME sección IX en el subíndice QW-161.3.

### 2.3.3. Probetas de ensayo de doblez guiado

Son obtenidas a partir de la tubería soldada, las probetas tienen las dimensiones acordes a lo estipulado en el código ASME sección IX, subsección QW462.3, sus dimensiones se encuentran en la Figura 2.4.

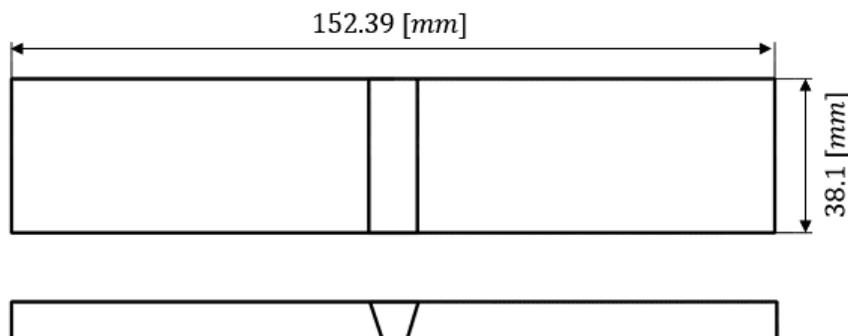


Figura 2.4. Dimensiones de probetas de doblez guiado.

(Fuente: ASME IX, 2010)

### 2.3.4. Equipo de ensayo de doblado guiado

El ensayo se lleva a cabo en el Laboratorio de Soldadura de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional. Las especificaciones del equipo se detallan en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6. Especificaciones de máquina de ensayo de doblez guiado.

Descripción	Especificación	Imagen
<b>Marca:</b>	S/N	
<b>Modelo:</b>	S/N	
<b>RPM:</b>	1720 [rpm]	
<b>Aplicación de carga:</b>	Sistema hidráulico	

(Fuente: Propia, 2018)

### 2.3.5. Procedimiento de ensayo de doblez guiado

- Dimensionar la probeta de acuerdo al código ASME sección IX.
- Colocar la probeta sobre los rodillos fijos de la máquina, verificando que el área analizar quede en la parte inferior y aplicar la carga hasta que convexa.
- Retirar la probeta de la máquina de doblado para analizar visualmente la superficie, si existen indicaciones registrar las medidas con ayuda de un calibrador pie de rey.
- Validar los resultados obtenidos con la norma.

## 2.4. Ensayo de proceso de corrosión bajo esfuerzos

Para la prueba de salinidad se toma como referencia la norma ASTM-B117 (Standard Practice for Operating Salt Spray Apparatus) y su equivalente ISO 8407:2009 (Corrosion of metales an alloys), que detallan el proceso de corrosión acelerada bajo condiciones controladas en una cámara cerrada de niebla salina expuesta a pulverización indirecta continua. Se trabaja con una solución Tipo IV según la ASTM-D1193 a una velocidad de 1,0 a 2,0 [ml/hora] y temperatura de la región costa en estado estacionario con un pH neutro o también denominada NSS (Neutral Sal Spray), y otros parámetros principales a controlar que se detallan en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7. Principales parámetros a controlar en el ensayo de corrosión.

Parámetro	Indicación	Norma
Tiempo de exposición 1	2160 horas (90 días)	
Tiempo de exposición 2	720 horas (30 días)	
Periodos de revisión 1	Cada 15 días	
Periodos de revisión 2	Cada 7 días	
Solución	Tipo V	ASTM-D1193 Secction 8.1.
PH	6,5 A 7,2	ASTM-D1193 Secction 8.2.
Temperatura	35 ± 2 °C (95 ± 3°F)	ASTM-D1193 Tabla 2.
Fuerzas (carga)	No sobrepasar el límite elástico	

(Fuente: Propia, 2018)

El proceso de corrosión ocasiona el deterioro del material a través del tiempo, por lo que requiere dos tiempos de exposición con periodos diferentes de inspección para obtener un registro de los cambios presentados en las probetas, tal como: superficiales (coloración) y físicas (deformación y variación de masa) considerando la carga aplicada. El reconocimiento de los resultados se realiza en el material de aporte (MA), material base (MB) y zona afectada por calor (ZAC), haciendo énfasis en la raíz de soldadura por estar en contacto directo con los fluidos de trabajo en sus diferentes aplicaciones.

### 2.4.1. Velocidad de corrosión

Es importante calcular la velocidad de corrosión de los procesos realizados en laboratorio bajo parámetros controlados, y mediante la técnica gravimétrica (Ecuación 2.2.) propuesta por (Dos Santos, V., Sevilla, C., Tisoy, L., 2012), la misma que relaciona la variación de masa y tiempo de exposición del material en contacto con un medio corrosivo.

$$V_{corr} = \frac{m_i - m_f}{p * A * t} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Donde:

$V_{corr}$ : velocidad de corrosión [mm/año]

$m_i, m_f$ : masa inicial y masa final respectivamente [mg]

$p$ : densidad del material [ $mg/mm^3$ ]

$A$ : área de exposición [ $mm^2$ ]

$t$ : tiempo de exposición [años]

La velocidad se expresa en su mayoría como la pérdida de material en [mm/año], para lo cual se tiene como referencia datos de la velocidad de corrosión del acero inoxidable 316L y acero inoxidable dúplex 2205 en una solución de  $NaCl$  5% +  $CH_3COOH$  0,55%, como se muestra en la Figura 2.5.



Figura 2.5 Velocidad de corrosión [mm/año] para acero 316L y DX2205.

(Fuente: APERAM, 2013)

### 2.4.2. Probetas para ensayo de corrosión

Las probetas serán dimensionadas acorde a lo especificado en la “ASTM Special Technical Publication No. 425 (Stress Corrosion Testing)”, con agujeros pasantes taladrados como se muestra en la Figura 2.6.

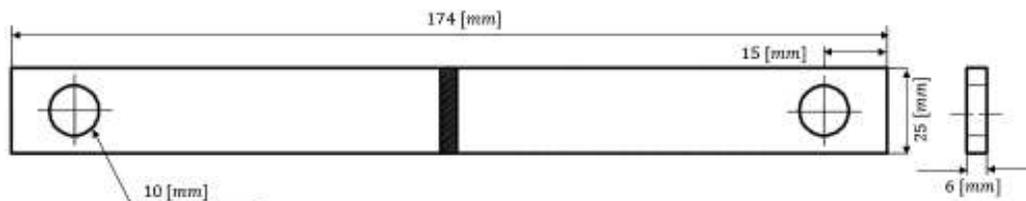


Figura 2.6. Dimensiones de probetas para ensayo de corrosión.

(Fuente: ASTM E8/E8M-09, 2009)

### 2.4.3. Portaprobetas para corrosión bajo esfuerzos

La carga se distribuye en tres puntos, similar al ensayo de doblez, con una carga aplicada directamente sobre el cordón de soldadura. Se diseña un portaprobetas con ballestas de automóvil (muelle) y pernos de acero inoxidable M8X100 soldados en los extremos como se muestra en la Figura 2.7. literal a).

El muelle central simulará un apoyo vertical fijo y mediante pernos se aplicarán torques que simularán fuerzas en los extremos de las probetas como indica la Figura 2.7. literal b). Al montar las probetas como muestra la Figura 2.7. literal c), se debe prevenir el contacto directo entre las muestras a corroer y el portaprobetas, para evitar la existencia de corrosión galvánica, esto se logrará utilizando materiales aislantes y/o pintura anticorrosiva. Este método permitirá analizar la corrosión bajo esfuerzo y acelerar el proceso de investigación.

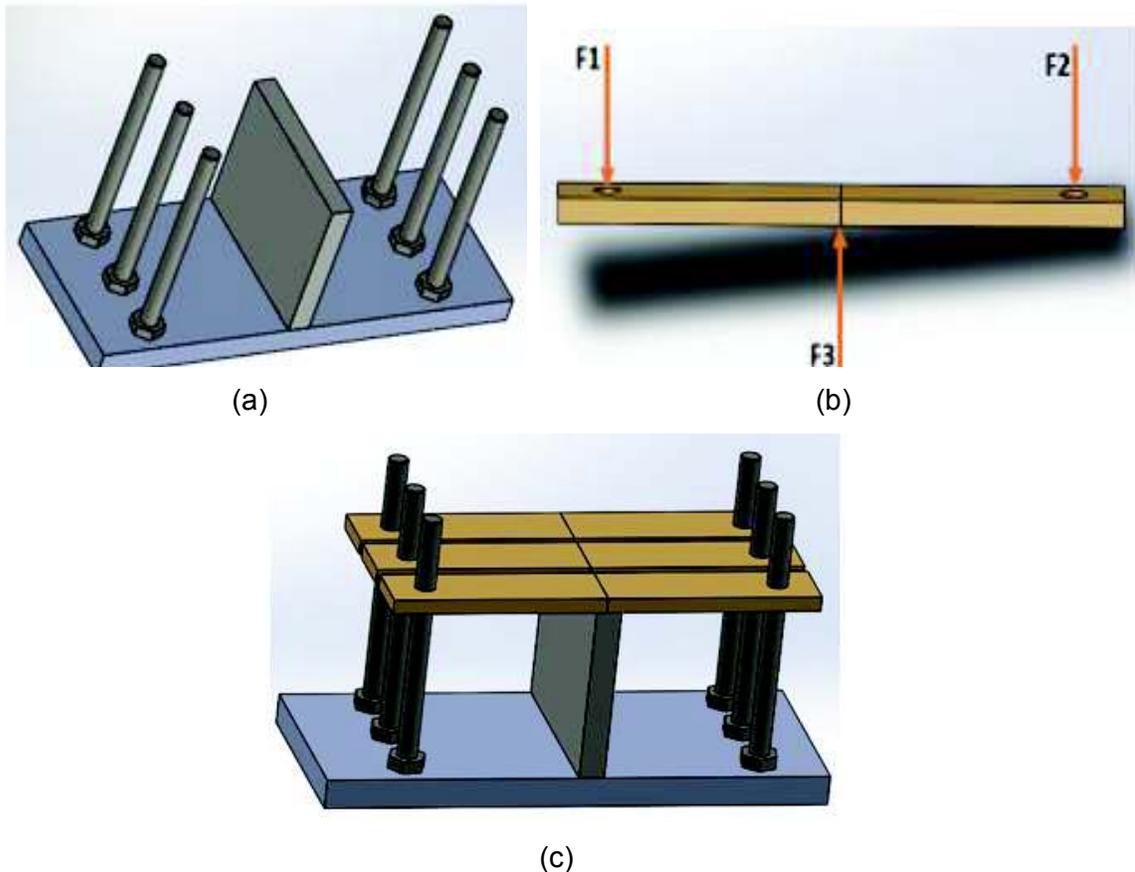


Figura 2.7. Metodología de corrosión a) Portaprobetas b) Fuerzas aplicadas sobre la probeta y c) Montaje de probetas en porta probetas.

(Fuente: Propia, 2018)

#### 2.4.4. Distribución de muestras

Las muestras obtenidas de la tubería soldada se dividen en dos grupos, para los diferentes tiempos de corrosión, periodos de revisión y cargas de esfuerzo, esto se detalla en la Tabla 2.8. El cálculo del torque aplicado se muestra en el ANEXO V.

Tabla 2.8. Distribución de las muestras en el ensayo de corrosión.

No.	Tiempo de exposición [horas] (días)	Periodo de revisión	Denominación	Torque [Nm]	Figura
1	2160 (90)	c /15 días	P1	8,13	
2			P2	2,71	
3			P3	8,13	
4			P4	5,42	
5			P5	5,42	
6			P6	2,71	
7	720 (30)	c /7 días	P11	8,13	
8			P22	5,42	
9			P33	2,71	

(Fuente: Propia, 2018)

### 2.4.5. Equipo de corrosión

El proceso de corrosión se realiza en el Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF) de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional, mediante la cámara de niebla salina para el proceso de corrosión por pulverización, las muestras son montadas en el portaprobetas y su torque es verificado por medio de un torquímetro digital, la variación de la masa es registrada con una balanza de precisión y el registro de fotos se lo realizará con el microscopio metalográfico, las especificaciones de cada equipo se detalla en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9. Especificaciones de los equipos utilizados en el ensayo de corrosión.

Descripción	Especificación	Imagen
<b>Cámara de niebla salina</b>		
<b>Marca:</b>	S/N	
<b>Modelo:</b>	S/N	
<b>Capacidad de carga:</b>	10 [litros]	
<b>Aplicación de carga:</b>	Sistema hidráulico	
<b>Capacidad:</b>	500 [g]	

---

### Balanza de precisión

---

<b>Marca:</b>	CITIZEN
<b>Modelo:</b>	M2
<b>Capacidad:</b>	500 [g]



---

### Torquímetro

---

<b>Marca:</b>	ECLATORQ
<b>Modelo:</b>	ADE2-030
<b>Torque:</b>	1,5 - 30 [N]
<b>Longitud:</b>	390 [mm]



---

### Microscopio metalográfico trinocular

---

<b>Marca:</b>	OLYMPUS
<b>Modelo:</b>	SZX7
<b>Voltaje:</b>	100 - 120 [V] 230 - 240 [V]
<b>Frecuencia:</b>	50/60 [Hz]



(Fuente: Propia, 2018)

---

## 2.4.6. Procedimiento de proceso de corrosión

- Preparar las probetas (dimensiones y limpieza) y medir la masa inicial de cada una. (En este punto se inicia el proceso cíclico a lo largo del tiempo de exposición con revisiones según la Tabla 2.8.)
  - Montar las probetas en el portaprobetas, fijando los torques mencionados en la Tabla 2.6. y verificando que no haya contacto alguno entre ambas.
  - Preparar la solución y la máquina a las condiciones de temperatura anteriormente indicadas, que deberán ser controladas periódicamente.
  - Colocar el portaprobetas en la máquina de corrosión salina, que formará un ángulo entre 15 y 30° desde la vertical, en dirección principal al flujo de niebla a través de la cámara, sobre la base de la superficie dominante.

- Verificar que las probetas no estén en contacto entre ellas ni con otro material metálico y evitar que la solución de sal que ya entró en contacto con una probeta no goteé sobre la otra.
- Al cumplir el periodo de revisión se desmontará las probetas para tomar fotografías y controlar el avance de la corrosión mediante el microscopio OLYMPUS SZX7.
- Limpiar las probetas y medir su masa.
- Limpiar la cámara de corrosión salina en su totalidad.

(Se repetirá el proceso, mientras se cumpla el periodo estipulado.)

- Evaluar y seleccionar las probetas que presentaron mayor porcentaje de corrosión, en función de los siguientes parámetros: variación de masa, análisis de corrosión superficial, carga aplicada (torque) y tiempo de exposición.

## 2.5. Análisis metalográfico

El ensayo examina y determina la microestructura subyacente de las fases entre las diferentes zonas de interés, utilizando varias escalas de longitud o niveles de aumento, que van desde un examen visual hasta aumentos de más de 1000X. El estudio se enfoca en la raíz de soldadura, siendo zonas de análisis el MB, zona de fusión, MA, ZAC y las fronteras entre éstos, para determinar si el proceso de soldadura dio como resultado inclusiones no metálicas, microcavidades de contracción, precipitados o corrosión que puedan modificar las características del material. Los parámetros más importantes a controlar en este proceso se detallan en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10. Principales parámetros a controlar en las metalografías.

Parámetro	Indicación	Norma
Superficie de las probetas	Limpieza con alcohol y algodón	LMDF
Velocidad de pulido grueso	Cabezal FORCIMAT 125 [rpm]	LMDF
	Base FORCIMAT 250 [rpm]	LMDF
Velocidad de pulido fino	Cabezal FORCIMAT 100 [rpm]	LMDF
	Base FORCIMAT 150 [rpm]	LMDF
Presión de pulido	Cabezal FORCIMAT 10 [lbf]	LMDF
Medio abrasivo	Alúmina, paño, lubricante de diamante	LMDF
Tiempo de ataque químico	5 a 8 segundos	LMDF

(Fuente: Propia, 2018)

Las probetas pulidas serán atacadas químicamente con el reactivo MARBLE de composición 4 [g] de  $CuSO_4$ , 20 [ml] de HCl y 20 [ml] de  $H_2O$ , con ataque por inmersión, para mejorar el contraste en las superficies de las probetas analizar con el fin de visualizar la microestructura, los límites de grano y fases o superficies del grano, mediante el microscopio y el uso de filtros ópticos.

### 2.5.1. Probetas para análisis metalográfico

Las probetas que hayan presentado mayor porcentaje de corrosión serán cortadas en dirección transversal para examinar el comportamiento de corrosión en el material de aporte y en el material base como se indica en la Figura 2.8.

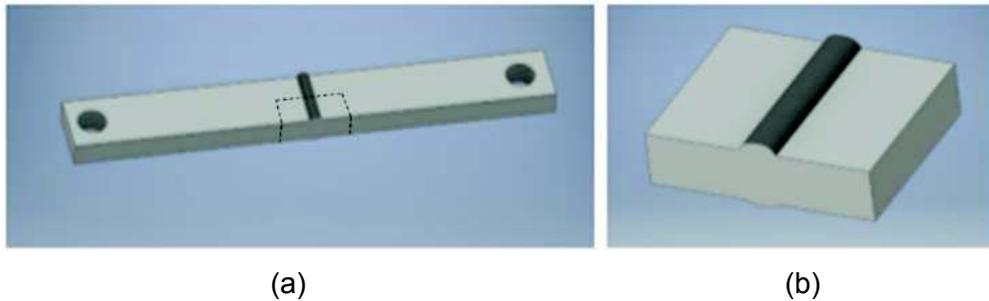


Figura 2.8. Probeta para ensayo de corrosión a) Sección a cortar marcada en la probeta y b) Corte transversal para análisis metalográfico.

(Fuente: Propia, 2018)

Para el proceso metalográfico las probetas cortadas serán montadas en un molde con resina catalizador y acelerador como muestra la Figura 2.9. facilitando su manipulación en los siguientes procesos.

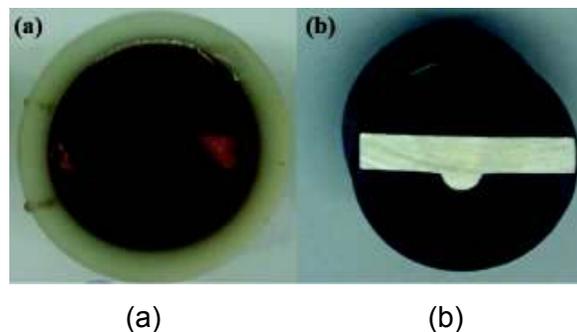


Figura 2.9. Probeta para el ensayo metalográfico a) Moldeado de la probeta y b) Probeta montada.

(Fuente: Propia, 2018)

## 2.5.2. Equipo de metalografía

El análisis se lleva a cabo en el Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF) de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional. El proceso requiere una preparación con desbaste grueso en la máquina desbastadora, pulido fino en la máquina semiautomática FORCIMAT y el registro de fotos microscópicas en el microscopio invertido, sus especificaciones se muestran en la Tabla 2.11.

Tabla 2.11. Especificaciones de los equipos utilizados en el análisis metalográfico.

Descripción	Especificación	Imagen
<b>Máquina de desbaste grueso</b>		
<b>Marca:</b>	<b>BUEHLER</b>	
<b>Modelo:</b>	121-0M-84	
<b>Voltaje:</b>	1 [Hp]	
<b>Amperaje:</b>	6,2 [A]	
<b>Número abrasivo:</b>	100 [ $g/pulg^2$ ]	
<b>Máquina desbastadora y pulidora</b>		
<b>Marca:</b>	FORCIMAT	
<b>Modelo:</b>	FORCIPOL	
<b>Voltaje:</b>	230 [V]	
<b>Potencia:</b>	0,75 [Hp]	
<b>Frecuencia:</b>	50/60 [Hz]	
<b>Año:</b>	2018	
<b>Microscopio invertido trinocular</b>		
<b>Marca:</b>	OLYMPUS	
<b>Modelo:</b>	GX41F	
<b>Voltaje:</b>	100 -120 [V] 230 - 240 [V]	
<b>Potencia:</b>	85 [VA]	
<b>Frecuencia:</b>	50/60 [Hz]	
<b>Año:</b>	2018	

(Fuente: Propia, 2018)

Durante el proceso también se hace uso de otras herramientas y materiales como sierra manual (cortar las probetas con sus dimensiones), resina catalizador y acelerador (montar la probeta a ensayar), calibrador pie de rey y regla metálica.

### **2.5.3. Procedimiento de ensayo de metalografía**

- Cortar las probetas de forma transversal, con dimensiones aproximadas de 15 y 20 [mm] de alto y ancho respectivamente, y montar en un molde compuesto de resina catalizador y acelerador.
- Efectuar el desbaste grueso en la superficie a estudiar con lija No. 100, para remover las imperfecciones ocasionadas por el corte.
- Realizar el desbaste fino para remover las imperfecciones que resulta del desbaste grueso, mediante lijas No. 240, 320, 600 y 1500.
- Proceder con el pulido fino mediante el paño de 1 a 6 micras con alúmina y lubricante de diamante.
- Realizar un registro de las micrografías de las superficies pulidas.
- Ejecutar el ataque químico con el reactivo MARBLE.
- Realizar un registro de las macrografías y micrografías de las superficies atacadas, haciendo uso de diferentes magnificaciones para reconocer las fases principales, secundarias, imperfecciones, corrosión y elaborar tablas de resultados.

## **2.6. Ensayo de microdureza**

Es una prueba de dureza por penetración (indentador) ocasionando una huella superficial en forma de pirámide recta de base cuadrada con un ángulo determinado, el valor de la dureza se obtiene en escala Vickers, midiendo las diagonales de la huella después de quitar la carga. Las zonas a analizar son: MB, ZAC, MA para cuantificar si existe variación en la dureza.

### **2.6.1. Probetas para ensayo de microdureza**

Las probetas para este ensayo son las empleadas en el análisis metalográfico, y se selecciona cuatro zonas de estudio divididas en: dos zonas sobre la ZAC (Z1 y Z3) en dirección transversal dirigida al centro, una zona en el MA (Z3) en dirección transversal dirigida al centro y una zona que contenga el MB-ZAC-MA (Z4) en dirección longitudinal como se indica la Figura 2.10.

En las zonas simples se realizará cuatro mediciones y en la zona compuesta cinco para cubrir las tres áreas, el ensayo se realizará bajo la norma ASTM E92-17 (Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials).

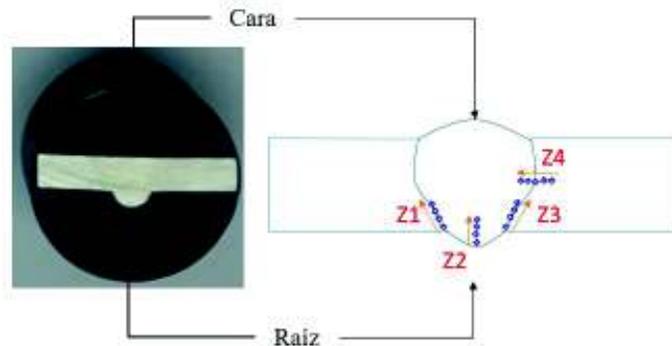


Figura 2.10. Probeta para el ensayo de microdureza y zonas de medición.

(Fuente: Propia, 2018)

## 2.6.2. Equipo para ensayo de microdureza

El ensayo se lleva a cabo en el Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF) de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional. El equipo empleado se detalla en la Tabla 2.12.

Tabla 2.12. Especificaciones del microdurómetro.

Descripción	Especificación	Imagen
<b>Marca:</b>	METKON	
<b>Modelo:</b>	Duroline-M	
<b>Carga:</b>	100 -1000 [g]	
<b>Peso:</b>	35 [kg]	

(Fuente: Propia, 2018)

## 2.6.3. Procedimiento de ensayo de microdureza

- Preparar la superficie de las probetas.
- Acondicionar el equipo de microdureza y calibrar con una carga de 300 [g].

- Colocar la probeta en la mordaza, verificando que esté completamente estática.
- Iniciar el Software Kameran para visualizar las indentaciones y tomar fotografías de las mismas.
- Enfocar el microdurómetro en la zona seleccionada e iniciar con la indentación.
- Cuantificar las medidas de microdurezas, por medio del trazo de diagonales.
- Realizar el reporte de microdureza.

## 2.7. Ensayo de dureza

Permite medir la resistencia de un material al comprimir contra la superficie a examinar una esfera de mayor dureza, aplicando una carga estática durante un cierto tiempo para cuantificar las dimensiones de la huella impresa. En este ensayo sobresalen dos métodos:

- Dureza Rockwell. - Se realiza en piezas fundidas y material metálico bajo el método descrito en la ASTM E8 y se realiza en las escalas A, B, C, D y F.
- Dureza Brinell. - Aplicable en mayor cantidad de metales bajo la norma ASTM E10.

### 2.7.1. Probetas para ensayo de dureza

Se examinará las probetas utilizadas para el análisis metalográfico, preparando las superficies mediante desbaste para obtener caras paralelas, y mediante dos barridos longitudinales se determinará la dureza en diferentes zonas de la superficie del material (MA, ZAC y MB) como se observa en la Figura 2.11., la norma a emplear es la ASTM E384 (Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials).

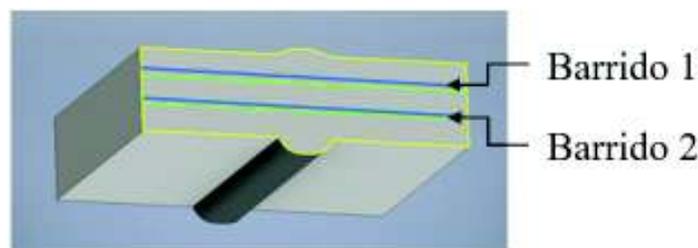


Figura 2.11. Probeta para ensayo de dureza y líneas de barridos de medición.

(Fuente: Propia, 2018)

### 2.7.2. Equipo para ensayo de dureza

El ensayo se lleva a cabo en el Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF) de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional. El equipo empleado se detalla en la Tabla 2.13.

Tabla 2.13. Especificaciones del durómetro.

Descripción	Especificación	Imagen
<b>Marca:</b>	HARDROCKER	
<b>Modelo:</b>	HR-150a	
<b>Dimensiones:</b>	70x70x21,5 [cm]	
<b>Peso:</b>	60 [kg]	
<b>Escala:</b>	HRC - HRB	
<b>Indentadores:</b>	Punta de acero de 1/16 pulg./Cono de diamante	

(Fuente: Propia, 2018)

### 2.7.3. Procedimiento del ensayo de microdureza

- Desbastar las superficies de la probeta garantizando el paralelismo entre ellas.
- Preparar el equipo con el indentador cono de diamante, carga de 150 [kgf], designadas para la dureza Rockwell C.
- Colocar la probeta sobre el soporte del durómetro.
- Elevar el soporte hasta que la punta del indentador entre en contacto con la probeta y luego encerrar el indicador analógico del durómetro.
- Elevar el soporte hasta que la aguja del indicador analógico de tres vueltas y llegue a cero.
- Cargar la máquina y esperar hasta que la perilla se estabilice.
- Descargar la máquina y tomar el valor marcado.
- Realizar los barridos necesarios en las zonas de análisis.

## 2.8. Ensayo de microscopía electrónica de barrido EDS

Mediante la microscopía electrónica de barrido (SEM) monodimensional (mapa y línea) se revela la distribución de los elementos en la muestra, proporcionando información cuantitativa y cualitativa de los elementos químicos presentes en el material. Una de las aplicaciones relevantes de las técnicas de SEM es el microanálisis de rayos X con la técnica EDS (Energy-Dispersive Spectroscopy), utilizada para identificar los elementos y cantidad presentes en un área, en una línea, o un punto de interés de la muestra.

Además, permite obtener un mapa o perfil químico, que revela las posibles concentraciones de cada aleante en el metal de análisis y comprobar la existencia de los principales aleantes que intervienen en la corrosión.

### 2.8.1. Probetas para el ensayo de microscopía electrónica de barrido

La probeta para realizar la microscopía electrónica de barrido EDS será escogida bajo los criterios de: mayor coloración superficial, mayor pérdida de masa y mayor carga constante aplicada, la cual debe ser maquinada para obtener las medidas requeridas del soporte, estas dimensiones se representan en la Figura 2.12.

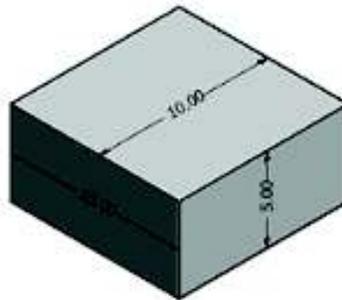


Figura 2. 12. Dimensiones de probeta para microscopía electrónica de barrido.

(Fuente: Propia, 2018)

### 2.8.2. Equipo para microscopía electrónica de barrido

El ensayo se lleva a cabo en el Departamento de Metalurgia Extractiva (DEMEX) de la Facultad de Ingeniería Química de la Escuela Politécnica Nacional. El equipo empleado es un espectrómetro de chispa cuyas especificaciones se detalla en la Tabla 2.14.

Tabla 2.14. Especificaciones del espectrómetro de barrido electrónico.

Descripción	Especificación	Imagen
<b>Marca:</b>	SPECTRO	<p>Una fotografía del equipo de laboratorio, un espectrómetro de chispa SPECTRO MAX, que incluye una columna vertical, un brazo de muestra y un detector.</p>
<b>Modelo:</b>	SPECTRO MAX	
<b>Voltaje:</b>	230/115 [V]	
<b>Frecuencia:</b>	50/60 [Hz]	

(Fuente: Propia, 2018)

### **2.8.3. Procedimiento para análisis de composición química**

- Preparar la probeta con las dimensiones adecuadas de superficie y espesor, seguido de la limpieza con alcohol y ultrasonido.
- Montar la probeta en los soportes y adherirla por medio de una cinta de carbono con doble cara adhesiva.
- Cerrar la tapa del portamuestras y realizar el proceso de vacío.
- Seleccionar la zona para análisis de la composición química (EDS).
- Tomar fotos en las zonas de interés.
- Seleccionar en la tabla periódica del software los elementos aleantes a estudiar.
- Guardar el informe con los datos obtenidos.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Resultados

Luego de concluir la experimentación se procede con la recopilación de resultados obtenidos en los ensayos mecánicos y metalográficos, mediante macrografías y micrografías en el orden descrito en el capítulo anterior. Los valores resultantes tendrán un proceso de comparación y discusión sobre los efectos que tienen sobre las propiedades del material.

##### 3.1.1. Resultados del ensayo de tracción

El informe emitido por el Laboratorio Análisis de Esfuerzos y Vibraciones (LAEV) detalla los valores de resistencia, elongación y carga máxima de las tres probetas ensayadas (ver ANEXO VI) y que se denominan como: ET1, ET2 y ET3, la inspección visual de la superficie de falla se observa en la Figura 3.1. y los valores resultantes se presentan en la Tabla 3.1.

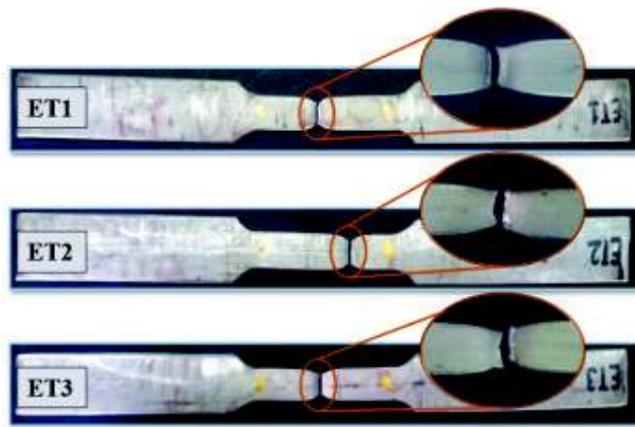


Figura 3.1. Probetas del material base ensayadas bajo tracción.

(Fuente: Propia, 2018)

Tabla 3.1. Resultados del ensayo de tracción.

PROPIEDAD	ET1	ET2	ET3
Resistencia a la fluencia [MPa]	661,90	648,10	655,00
Resistencia a la tracción [MPa]	787,40	773,90	775,20
Carga máxima registrada [N]	57.026	55.870	56.937
Porcentaje de elongación [%]	37,00	36,50	37,00

(Fuente: Propia, 2018)

Las probetas del material base ensayadas presentan una deformación plástica localizada entre las marcas de referencia (2 plg.), la fractura es de tipo dúctil y la superficie de fractura es de tipo fibrosa con cizallamiento.

### 3.1.2. Resultados del proceso de soldadura

De los datos del procedimiento de soldadura descritos en el WPS se calcula el calor de entrada en cada pase, sus resultados se detallan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Calor de entrada resultante en los pases del procedimiento de soldadura.

Pases	Corriente [A]	Voltaje [V]	Velocidad de avance [mm/s]	Calor de entrada [kJ/mm]	Imagen
1	76,00	8,00	0,50	1,22	
2	95,00	9,00	0,67	1,28	
3	95,00	10,00	0,83	1,14	
4	95,00	8,00	0,67	1,14	

(Fuente: Propia, 2018)

Se obtiene una mínima variación entre los resultados de calor de entrada, siendo el mayor 1,28 [kJ/mm] en el segundo pase y el menor 1,14 [kJ/mm] en los dos últimos pases.

### 3.1.3. Resultados del ensayo de doblez guiado

Se realiza el ensayo a cuatro probetas; dos para doblado de cara (DC1 y DC2), y dos de raíz (DR1 y DR2), la inspección visual se muestra en la Figura 3.2.

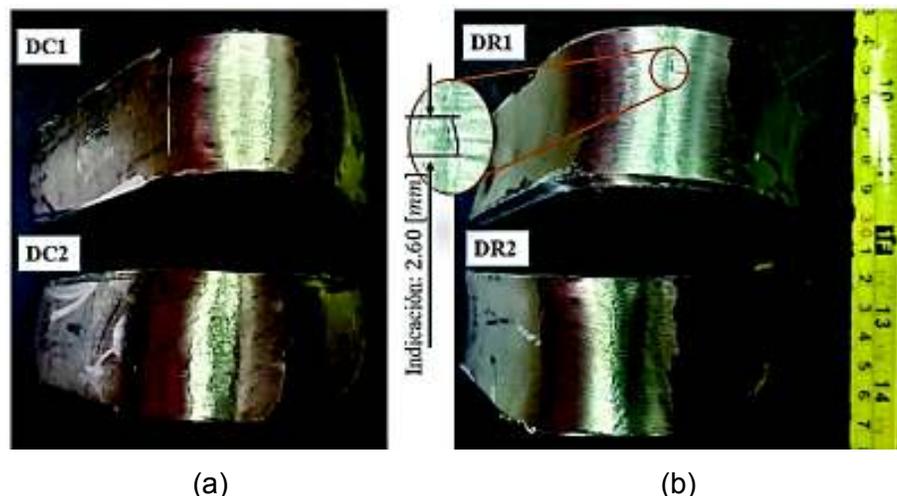


Figura 3.2. Probetas ensayadas en doblez guiado, (a) de cara y (b) raíz.

(Fuente: Propia, 2018)

Las probetas ensayadas en el doblado de cara no presentan indicación alguna en la zona de análisis ni en los bordes, mientras que en el ensayo de doblado de raíz se observa una indicación en la probeta DR1 de 2,6 [mm] de longitud.

### 3.1.4. Resultados del ensayo de corrosión

En los periodos establecidos se retira las muestras del portaprobetas para verificar el cambio de masa presentadas en las Tablas 3.3. y 3.4.

Tabla 3.3. Resultados de la variación de masa en las probetas expuestas a 30 días.

Probetas expuestas a 720 horas			
<b>Torque [Nm]</b>	2,71	5,42	8,13
<b>Probeta</b>	P33	P22	P11
<b>Masa [g]</b>			
<b>INICIO</b>	182,05	211,89	198,61
<b>7 [días]</b>	182,01	211,80	198,58
<b>15 [días]</b>	181,94	211,79	198,52
<b>21 [días]</b>	181,94	211,77	198,50
<b>30 [días]</b>	181,93	211,76	198,47
$\Delta_{masa}$	<b>0,12</b>	<b>0,13</b>	<b>0,14</b>

(Fuente: Propia, 2018)

En los 30 días de exposición, la mayor variación de masa producida es 0,14 [g] en la probeta P11 con T= 8,13 [Nm] y la menor variación de masa es 0,12 [g] en la probeta P33 con T= 2,71 [Nm].

Tabla 3.4. Resultados de la variación de masa en las probetas expuestas a 90 días.

Probetas expuestas a 2160 horas						
<b>Torque [Nm]</b>	2,71		5,42		8,13	
<b>Probeta</b>	P6	P2	P4	P5	P1	P3
<b>Masa [g]</b>						
<b>INICIO</b>	184,32	178,77	181,78	182,27	188,64	198,60
<b>15 [días]</b>	183,50	177,84	180,97	181,44	187,61	197,73
<b>30 [días]</b>	182,27	176,63	179,96	180,53	186,64	196,51
<b>45 [días]</b>	182,19	176,58	179,87	180,47	186,55	196,45
<b>60 [días]</b>	182,14	176,56	179,86	180,43	186,53	196,43
<b>75 [días]</b>	181,87	176,48	179,77	180,38	186,46	196,40
<b>90 [días]</b>	181,85	176,41	179,76	180,38	186,40	196,34
$\Delta_{masa}$	<b>2,47</b>	<b>2,36</b>	<b>2,02</b>	<b>1,89</b>	<b>2,24</b>	<b>2,26</b>

(Fuente: Propia, 2018)

En los 90 días de exposición, la mayor variación de masa es 2,47 [g] en la probeta P6 con  $T= 2,71$  [Nm] y la menor variación de masa es 1,89 [g] en la probeta P5 con  $T= 5,42$  [Nm]. El torque aplicado permitió mantener a las probetas con carga constante, obteniendo como resultados que a  $T=8,13$  [Nm] las probetas presentaron deformación permanente al retirarlas del portaprobetas, mientras que a  $T= 2,71$  [Nm] y a  $T= 5,42$  [Nm] la deformación fue menor, pues al desmontarlas tendían a recobrar su forma original, la deformación presenciada en las probetas bajo cargas constantes se muestra en la Figura 3.3.

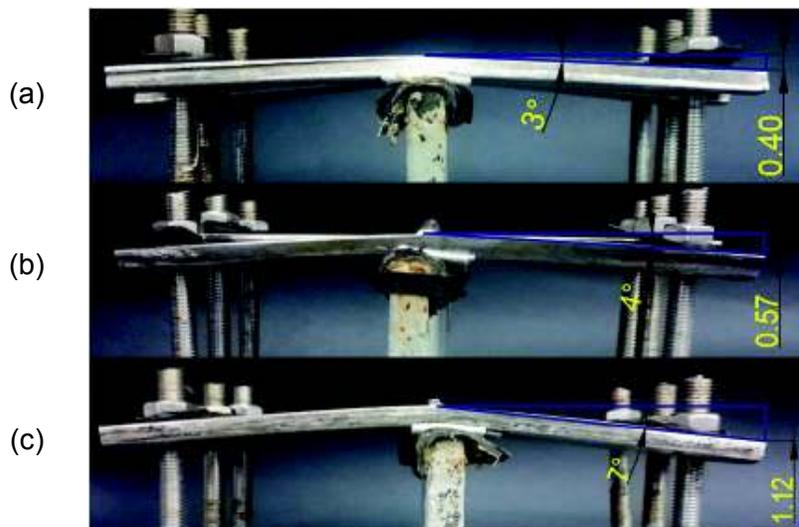


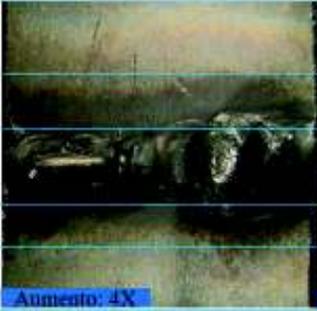
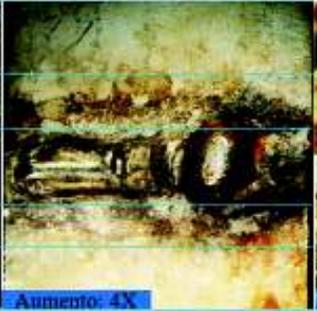
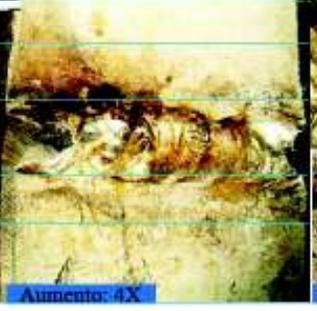
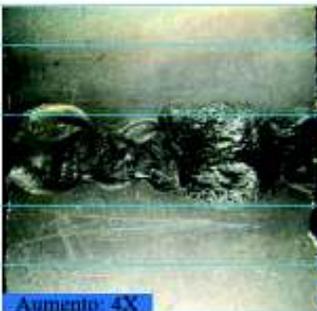
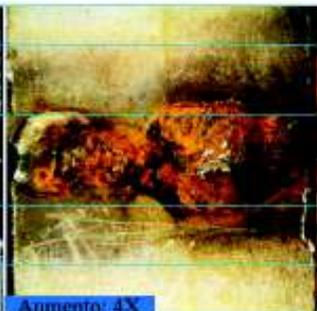
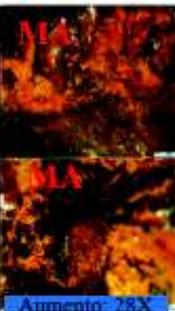
Figura 3.3. Ángulo y altura [mm] de deformación de las probetas de corrosión con torques de (a) 2,71 [Nm], (b) 5,42 [Nm] y (c) 8,13 [N m].

(Fuente: Propia, 2018)

El registro fotográfico de la corrosión superficial presente en las muestras se expone en la Tabla 3.5. y ANEXO VII.

Tabla 3.5. Inicio y final de las probetas expuestas al proceso de corrosión.

Proceso de corrosión					
MB					
ZAC					
MA					
ZAC					
MB					
<b>Probeta:</b>	<b>P3</b>	<b>Torque:</b>	<b>8,13 [Nm]</b>	<b>Tiempo de exposición:</b>	<b>2160 horas</b>

MB					
ZAC					
MA					
ZAC					
MB					
<b>Probeta:</b>	<b>P5</b>	Torque:	5,42 [Nm]	Tiempo de exposición:	2160 horas
MB					
ZAC					
MA					
ZAC					
MB					
<b>Probeta:</b>	<b>P6</b>	Torque:	8,13 [Nm]	Tiempo de exposición:	2160 horas
MB					
ZAC					
MA					
ZAC					
MB					
<b>Probeta:</b>	<b>P11</b>	Torque:	2,71 [Nm]	Tiempo de exposición:	720 horas

(Fuente: Propia, 2018)

En función de la **carga aplicada**, las probetas que presentan mayor coloración superficial son: P6 y P33 con  $T= 2,71$  [Nm], P4 con  $T=5,42$  [Nm] y P11 con  $T= 8,13$  [Nm], mientras que las de menor coloración son: P1 con  $T= 8,13$  [Nm] y P2 con  $T= 2,71$  [Nm]. En función del **tiempo de exposición**, las probetas presentan mayor coloración superficial al inicio del ensayo como lo muestran las probetas expuestas a 720 horas (30 días), y en periodos prolongados la corrosión continua, pero con menores zonas de coloración como se observa en las probetas expuestas a 2160 horas (90 días).

### 3.1.5. Resultados de la velocidad de corrosión

Con la ecuación mencionada en el capítulo anterior se obtiene la velocidad de corrosión para cada probeta. Los datos a utilizar y los resultados obtenidos se mencionan en las Tablas 3.6. y 3.7.

Tabla 3.6. Velocidad de corrosión para probetas ensayadas 720 horas.

Velocidad de corrosión				
$\rho = 78000 [mg/mm^3]$		$A = 4350 [mm^2]$		$t = 0.083 [s]$
Probeta	Torque	Masa inicial	Masa final	Velocidad de corrosión
	[Nm]	[mg]	[mg]	[mm/año]
<b>P33</b>	2,71	182050,00	181930,00	$4,26 \times 10^{-6}$
<b>P22</b>	5,43	211890,00	211760,00	$4,62 \times 10^{-6}$
<b>P11</b>	8,13	198610,00	198470,00	$4,97 \times 10^{-6}$
			<b>Promedio</b>	$4,62 \times 10^{-6}$

(Fuente: Propia, 2018)

Tabla 3.7. Velocidad de corrosión para probetas ensayadas 2160 horas.

Velocidad de corrosión				
$\rho = 78000 [mg/mm^3]$		$A = 4350 [mm^2]$		$t = 0.25 [s]$
Probeta	Torque	Masa inicial	Masa final	Velocidad de corrosión
	[Nm]	[mg]	[mg]	[mm/año]
<b>P6</b>	2,71	184320,00	181850,00	$2,91 \times 10^{-5}$
<b>P2</b>		178770,00	176410,00	$2,78 \times 10^{-5}$
<b>P4</b>	5,42	181780,00	179760,00	$2,38 \times 10^{-5}$
<b>P5</b>		182270,00	180380,00	$2,23 \times 10^{-5}$
<b>P1</b>	8,13	188640,00	186400,00	$2,64 \times 10^{-5}$
<b>P3</b>		198600,00	196340,00	$2,66 \times 10^{-5}$
			<b>Promedio</b>	$2,60 \times 10^{-5}$

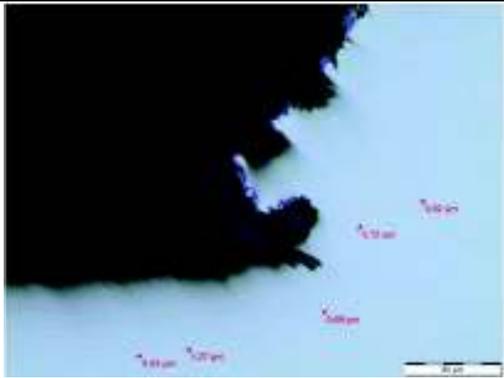
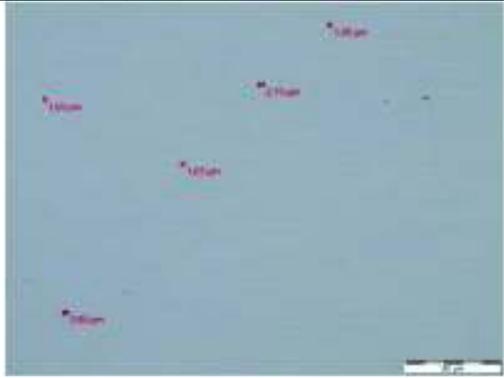
(Fuente: Propia, 2018)

En las muestras expuestas a 720 horas, la mayor velocidad de corrosión es  $4,26 \times 10^{-6}$  [mm/año] y la menor velocidad es  $4,97 \times 10^{-6}$  [mm/año], mientras que, en las muestras expuestas a 2160 horas, la mayor velocidad de corrosión es  $2,23 \times 10^{-5}$  [mm/año] y la menor velocidad es  $2,91 \times 10^{-5}$  [mm/año].

### 3.1.6. Resultados del análisis metalográfico

La superficie de las probetas pulidas sin ataque químico se presenta en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8. Análisis superficial de las probetas sin ataque químico.

Superficies sin ataque químico							
							
<b>Probeta:</b>	<b>P3</b>	Torque:	8,13 [N]	<b>Probeta:</b>	<b>P11</b>	Torque:	8,13 [Nm]
Aumento:	500X	Tiempo:	2160 horas	Aumento:	500X	Tiempo:	720 horas
							
<b>Probeta:</b>	<b>P5</b>	Torque:	5,42 [Nm]	<b>Probeta:</b>	<b>P6</b>	Torque:	2,71 [Nm]
Aumento:	500X	Tiempo:	2160 horas	Aumento:	500X	Tiempo:	2160 horas

(Fuente: Propia, 2018)

Las probetas P3 y P11 con mayor carga ( $T = 8,13 \text{ Nm}$ ), presentaron desprendimiento de material en el borde del MA, además de inclusiones con tamaño promedio de  $0,82 \text{ } \mu\text{m}$  y  $1,14 \text{ } \mu\text{m}$  respectivamente. Las probetas P5 y P6 no presentan ningún tipo de desprendimiento de material en los bordes, pero si inclusiones con tamaño promedio de  $2,02 \text{ } \mu\text{m}$  y  $1,10 \text{ } \mu\text{m}$  respectivamente.

El material base revela una microestructura plano-lineal de bandas alternadas de ferrita (zona oscura), austenita (zona clara), además de zonas de color gris, y por la forma la fase ferrítica-austenítica exhibe granos orientados en la dirección de laminación del material base como indica la Figura 3.4.

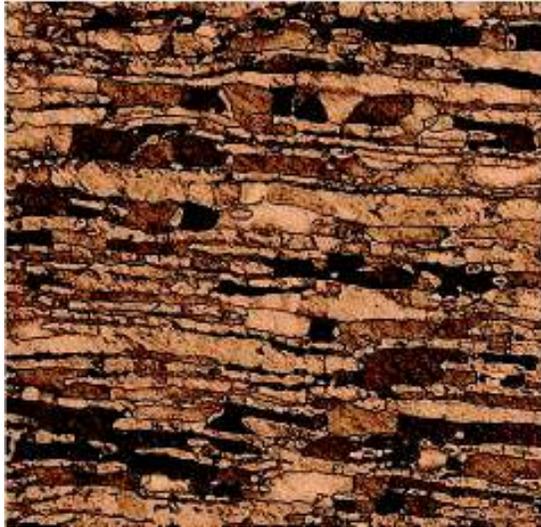


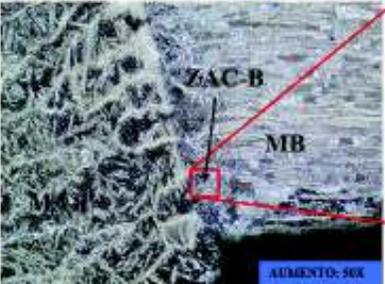
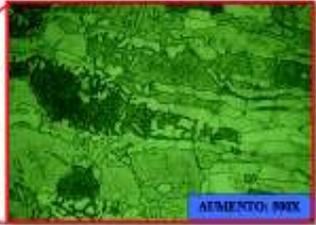
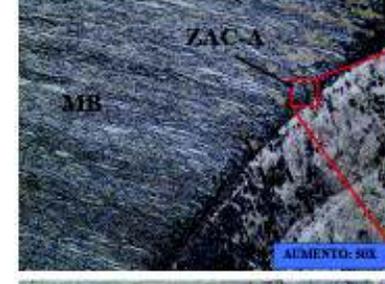
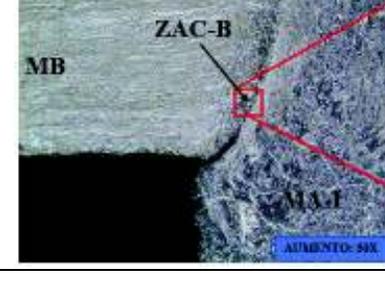
Figura 3.4. Microestructura del material base (500X).  
(Fuente: Propia, 2018)

En las zonas cercanas al cordón de soldadura en la raíz, son analizadas en el pase de raíz y pase de terminación, Tabla 3.9., identificando las siguientes zonas:

- MA-I: materia de aporte pase de raíz (1er pase de soldadura)
- MA-F: materia de aporte pase de terminación (4to pase de soldadura)
- ZAC-A: zona afectada por el calor tipo 1
- ZAC-B: zona afectada por el calor tipo 2

Tabla 3.9. Análisis metalográfico de las probetas con ataque químico.

Superficies sin ataque químico	
<b>Probeta: P3</b>	
Aumento: 50X, 100X y 500X	
Torque: 8,13 [Nm]	
Tiempo: 2160 horas	

<b>Probeta: P5</b>	
Aumento: 50X, 100X y 500X	
Torque: 5,42 [Nm]	
Tiempo: 2160 horas	
<b>Probeta: P6</b>	
Aumento: 50X, 100X y 500X	
Torque: 2,71 [Nm]	
Tiempo: 2160 horas	
<b>Probeta: P11</b>	
Aumento: 50X, 100X y 500X	
Torque: 8,13 [Nm]	
Tiempo: 720 horas	

(Fuente: Propia, 2018)

Las imágenes a 50X mostradas en la Tabla 3.9. presentan en el pase de raíz (MA-I) una microestructura con mayor porcentaje de ferrita (zona oscura), en el pase final mostrado a 100X se observa una microestructura con mayor contenido de austenita (zona clara) y las imágenes a 500X muestran la nucleación que sufren los granos por el proceso de soldadura en la zona ZAC, en donde los granos toman la forma de elipsoides, placas laterales y dendritas que nacen de los bordes de los granos.

La visualización de los pases de soldadura y las zonas afectadas por el calor se analizan mediante las macrografías que se presentan en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10. Macrografías del cordón de soldadura.

Superficies sin ataque químico							
<b>Probeta:</b>	<b>P3</b>	Torque:	8,13 [Nm]	<b>Probeta:</b>	<b>P11</b>	Torque:	8,13 [Nm]
Aumento:	500X	Tiempo:	2160 horas	Aumento:	500X	Tiempo:	720 horas
<b>Probeta:</b>	<b>P5</b>	Torque:	5,42 [Nm]	<b>Probeta:</b>	<b>P6</b>	Torque:	2,71 [Nm]
Aumento:	500X	Tiempo:	2160 horas	Aumento:	500X	Tiempo:	2160 horas

(Fuente: Propia, 2018)

En las macrografías se aprecia los diferentes pases realizados en el proceso de soldadura con una reducida área de la ZAC, y diferentes formas de la raíz con secciones donde el MA está en exceso formando un cordón abultado como se aprecia en las probetas P3, P5 y P11, y zonas donde el cordón es de menor volumen como se observa en la probeta P6, además existen imperfecciones en el borde del cordón como las que presentan las probetas P3 y P6.

### 3.1.7. Resultados del ensayo de microdureza

Las zonas analizadas se indican en la Figura 3.5., y los resultados del ensayo se presentan desde la Figura 3.6. hasta 3.9. Las marcas de indentación en las probetas se muestran en el informe del Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla. (ANEXO VIII)

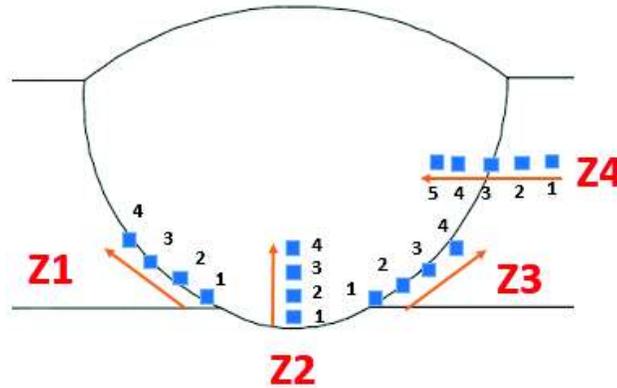


Figura 3.5. Zonas de análisis para el ensayo de microdureza HV.

(Fuente: Propia, 2018)

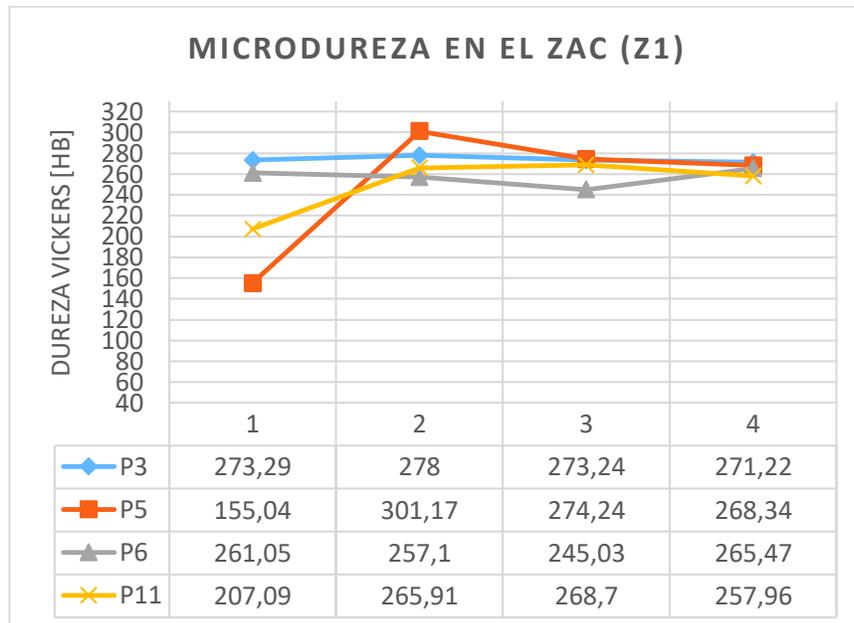


Figura 3.6. Variación de la microdureza en la zona Z1.

(Fuente: Propia, 2018)

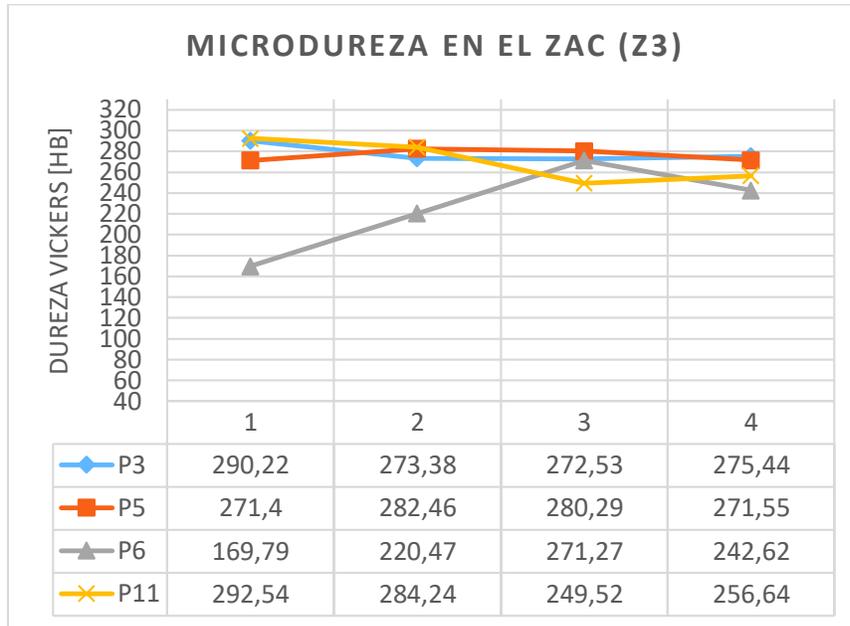


Figura 3.7. Variación de la microdureza en la zona Z2.

(Fuente: Propia, 2018)

Los resultados de las zonas Z1 y Z3 analizan el borde de la ZAC, obteniendo como mayor valor de microdureza 301,17 HV y menor valor de 155,05 HV.

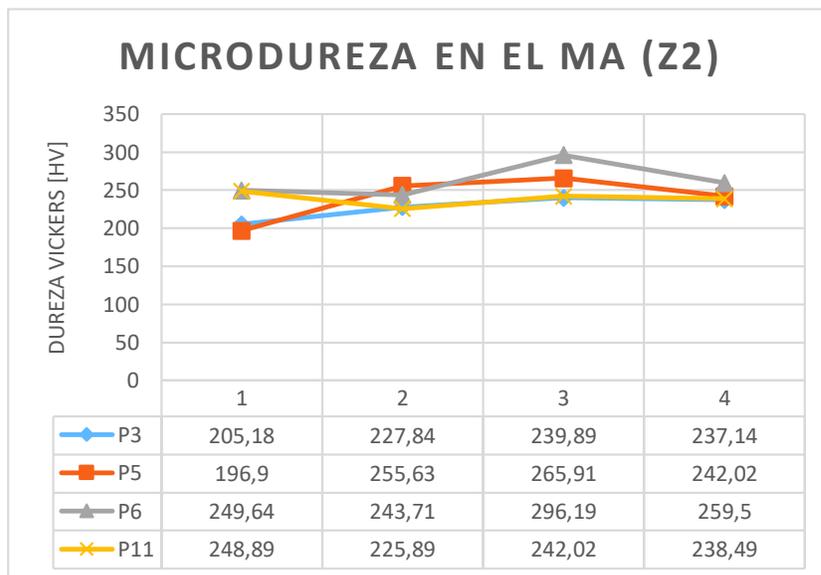


Figura 3.8. Variación de la microdureza en la zona Z3.

(Fuente: Propia, 2018)

Los resultados de la zona Z2 analizan el borde del MA, obteniendo como mayor valor de microdureza 296,19 HV y menor valor de 196,90 HV.

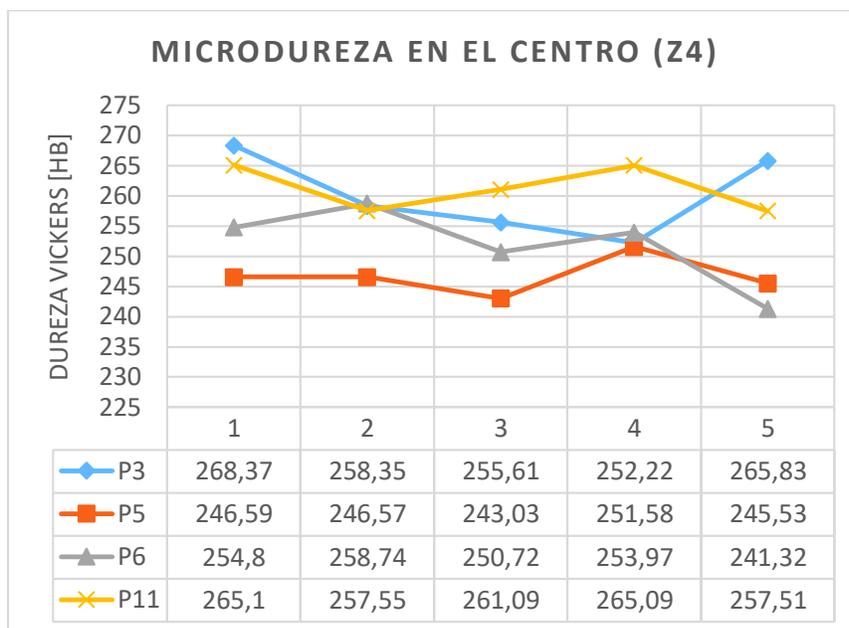


Figura 3.9. Variación de la microdureza en la zona Z4.

(Fuente: Propia, 2018)

Los resultados de la zona Z4 analizan el centro de la probeta de forma longitudinal, abordando las tres zonas del material (MB, ZAC y MA), obteniendo en el MB como mayor valor 268 HV y menor valor 246,59 HV, en la ZAC el mayor valor 257,55 HV y menor valor de 243,03 HV y en el MA el mayor valor de 265,83 HV y menor valor de 241,32 HV. De los resultados se observa que la microdureza disminuye en las zonas próximas a la ZAC.

### 3.1.8. Resultados del ensayo de dureza

Se obtiene información de durezas del MB, ZAC, y MA en Rockwell C (HRC), los resultados se representan en las Figuras 3.10., 3.11. y 3.12.

De las zonas de análisis se puede decir:

- En el MB el mayor valor es 20 HRC en la probeta P3, y el menor es 15 en la probeta P6.
- En la ZAC el mayor valor es 21 HRC en la probeta P5, y el menor es 17 en la probeta P6.
- En el MA el mayor valor es 20 HRC en la probeta P3, P5 y P7, y el menor es 17 en la probeta P5.

De lo que se puede observar, se tiene que el mayor valor de dureza es 21 HRC en la ZAC de la probeta P5, y el menor valor es 15 HRC en el MB de la probeta P6.

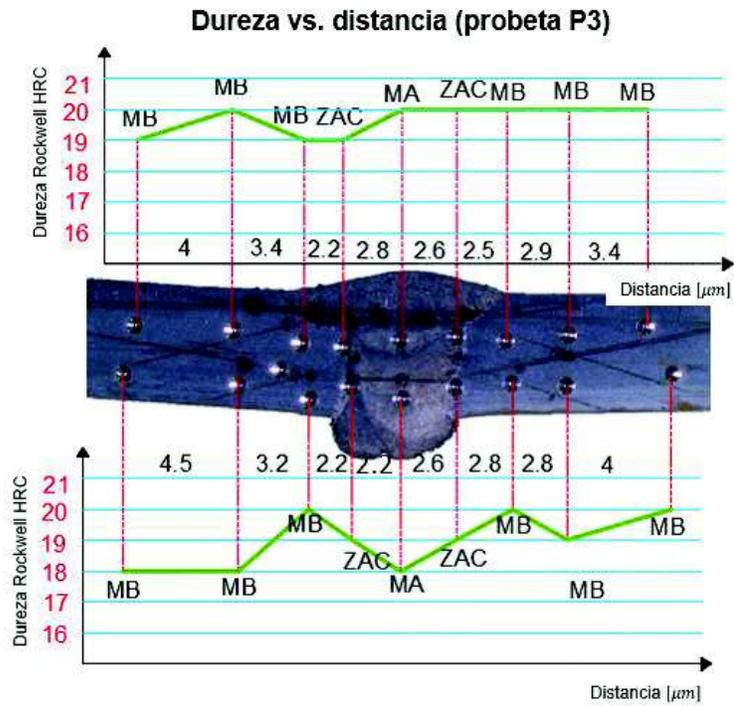


Figura 3.10. Resultados de la medición de dureza HRC en la probeta P3.  
(Fuente: Propia, 2018)

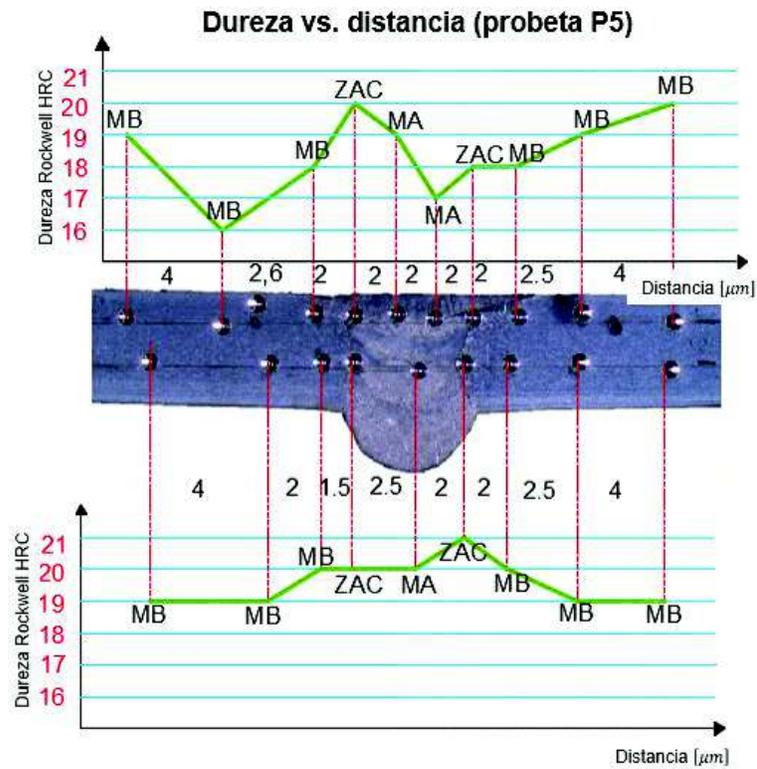


Figura 3.11. Resultados de la medición de dureza HRC en la probeta P5.  
(Fuente: Propia, 2018)

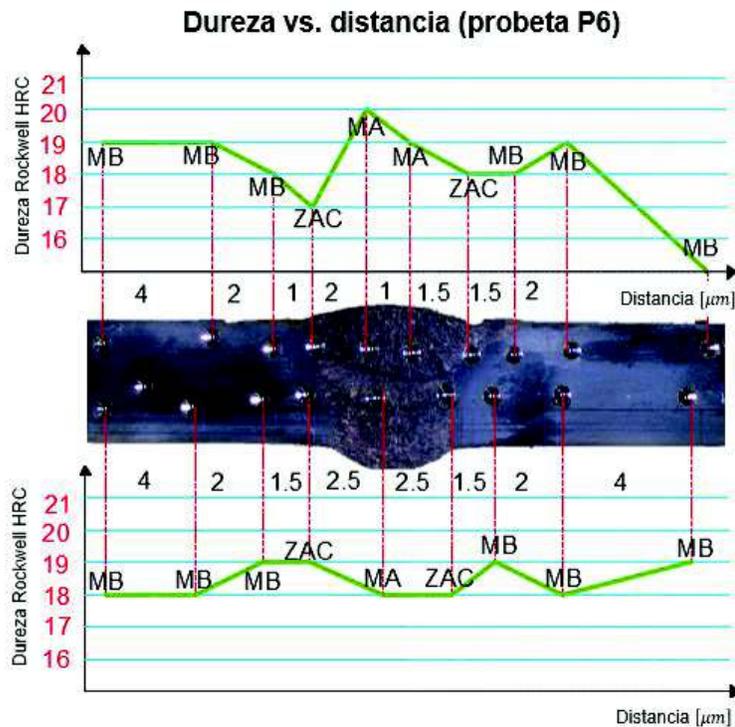
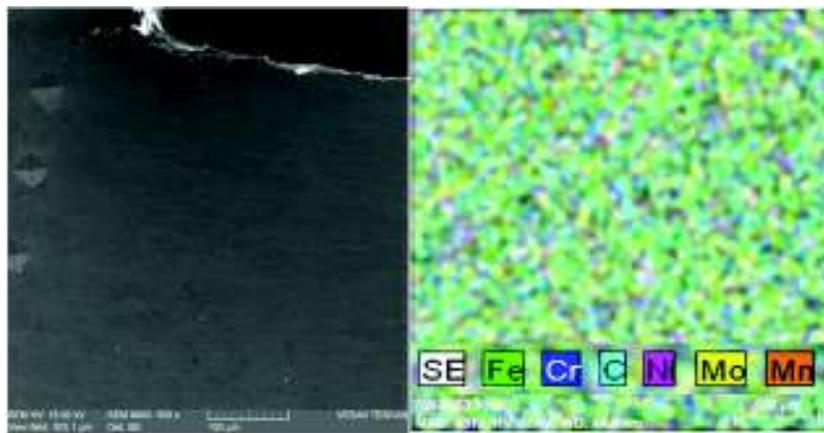


Figura 3.12. Resultados de la medición de dureza HRC en la probeta P6.

(Fuente: Propia, 2018)

### 3.1.9. Resultados del ensayo de microcopia electrónica de barrido EDS

Del informe de laboratorio (ANEXO IX) se obtiene el análisis realizado en el borde de la muestra cerca de la ZAC, Figura 3.13., de la probeta que presentó mayor coloración superficial y pérdida de masa en menor tiempo.



(a)

(b)

Figura 3.13. Microscopía electrónica de barrido, (a) zona de análisis y (b) representación de la variación de energía por EDS.

(Fuente: Propia, 2018)

Por la distribución de colores se observa que el borde de la probeta contiene una distribución uniforme de los aleantes, en esencial del Cr y Ni que son los principales elementos que actúan en contra de la corrosión del acero inoxidable, por lo que el ensayo también cuantifica el porcentaje de los aleantes presentes en el punto de análisis, como se presenta en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11. Resultados del porcentaje en peso obtenido mediante microscopía electrónica de barrido.

Elemento	Fe	Cr	C	Ni	Mo	Mn	Si
Porcentaje [%]	61.81	20.36	6.47	4.82	3.14	1.03	0.64

(Fuente: Propia, 2018)

Se verifica la presencia de los principales aleantes que conforman el acero inoxidable dúplex como son el Cr y Ni, los cuales confirman que el acero aún mantiene la característica de la alta resistencia a la corrosión.

## 3.2. Discusión

A partir de los hallazgos encontrados, se establece que la tubería de acero inoxidable dúplex 2205 soldada mediante proceso GTAW presenta corrosión en entornos hostiles. A continuación, se compara y se discute los resultados obtenidos con investigaciones ya realizadas referentes al tema, para evaluar el trabajo de titulación planteado.

### 3.2.1. Discusión del ensayo de tracción

Se verifica los resultados del ensayo con los descritos en la norma y las especificaciones de dos fabricantes (APERAM y CHILEXPO - ANEXO X). El ensayo presenta valores de: resistencia máxima a la tracción de 778,83 [MPa], límite elástico de 655,00 [MPa] y elongación de 36,83%, sobrepasando la norma y a CHILEXPO en todas sus propiedades, mientras que son comparables con las propiedades de APERAM, como indica la Figura 3.14., quien expone resultados de las propiedades mecánicas de un acero inoxidable dúplex 2205 laminado en frío y recocido para mejorar sus propiedades mecánicas, logrando así alcanzar valores de resistencia máxima a la tracción de 840,00 [MPa], límite elástico de 620,00 [MPa] y elongación de 29,00% (APERAM, 2013).

De igual manera la investigación realizada por Lazaro (2010), expone cifras de las propiedades mecánicas, tal como: resistencia máxima a la tracción de 775,00 [Mpa], límite elástico de 550,00 [MPa] y elongación de 31,60%, que del mismo modo son similares a las obtenidas en la presente investigación. Según Roberge (2000), los aceros deben ser laminados en frío, recocidos y pasivados para aplicaciones industriales que trabajen en entornos corrosivos.



Figura 3.14. Comparación de los resultados vs. la norma ASTM-A790 y fabricantes.

(Fuente: Propia, 2018)

### 3.2.2. Discusión del ensayo de soldadura y doblado guiado

En el proceso de soldadura el calor de entrada varía de 1,14 hasta 1,28 [kJ/mm], los cuales están dentro del rango permitido acorde a las recomendaciones de Avesta (2004), que señala que el calor de entrada no debe ser menor a 0,50 [kJ/mm] ni mayor a 2,50 [kJ/mm], por lo que se concreta que las variables de soldadura fueron bien manejadas.

En el proceso de doblado guiado la indicación de 2,60 [mm] está dentro del rango de aprobación, según lo indicado en el código ASME sección IX (1998), que señala que las indicaciones no deben exceder a 3 [mm] (1/8 pulg), por lo tanto, el proceso de soldadura realizada sobre la tubería es aprobado.

De lo mencionado se confirma que la calidad de la soldadura y del proceso, ayudan a reducir la formación de fases secundarias o la afectación de la microestructura del MA, ZAC y MB, además es necesario controlar el calor aportado para evitar distorsión por contracción lateral y cualquier tendencia a formar fases perjudiciales ya que pueden afectar la capacidad de servicio de la estructura soldada.

### 3.2.3. Discusión del ensayo de corrosión

Una vez terminado el tiempo de ensayo, se graficó la pérdida de masa en función del tiempo al cuál estuvieron sometidas las probetas en ambiente corrosivo y los resultados se muestran en las Figuras 3.15., 3.16. y 3.17.

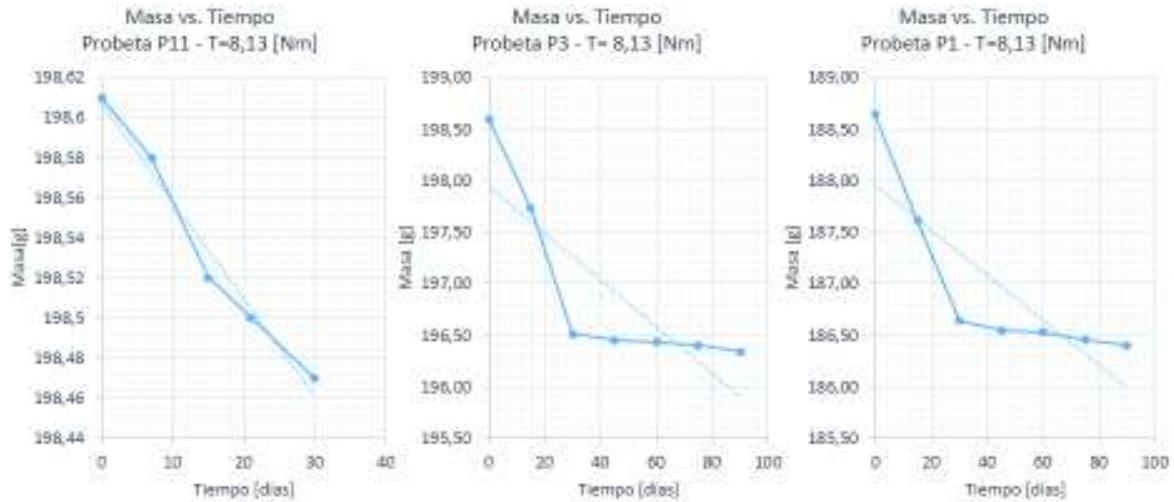


Figura 3. 15. Variación de la masa en las probetas con T=8,18 [Nm].

(Fuente: Propia, 2018)

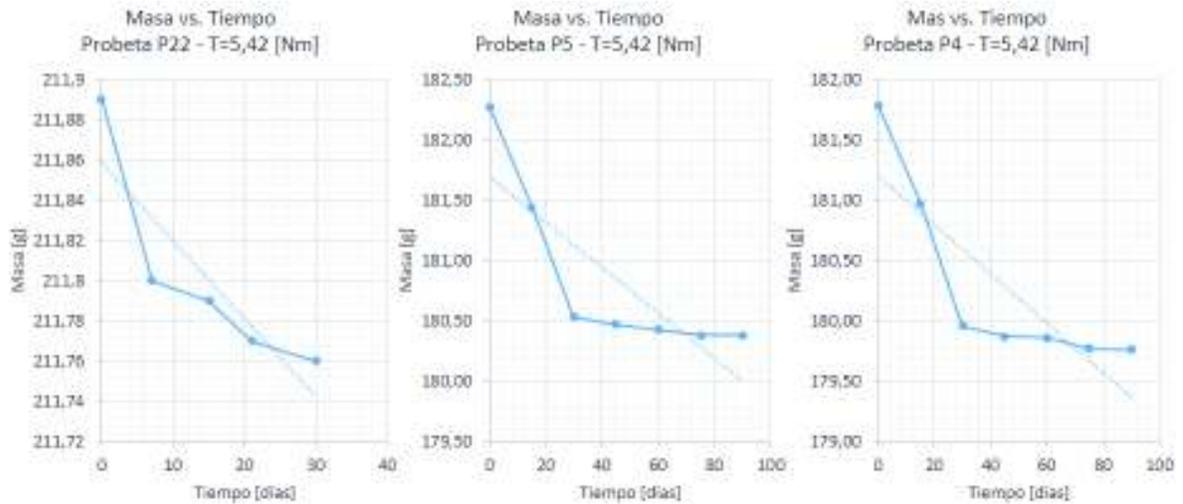


Figura 3. 16. Variación de la masa en las probetas con T=5,42 [Nm].

(Fuente: Propia, 2018)

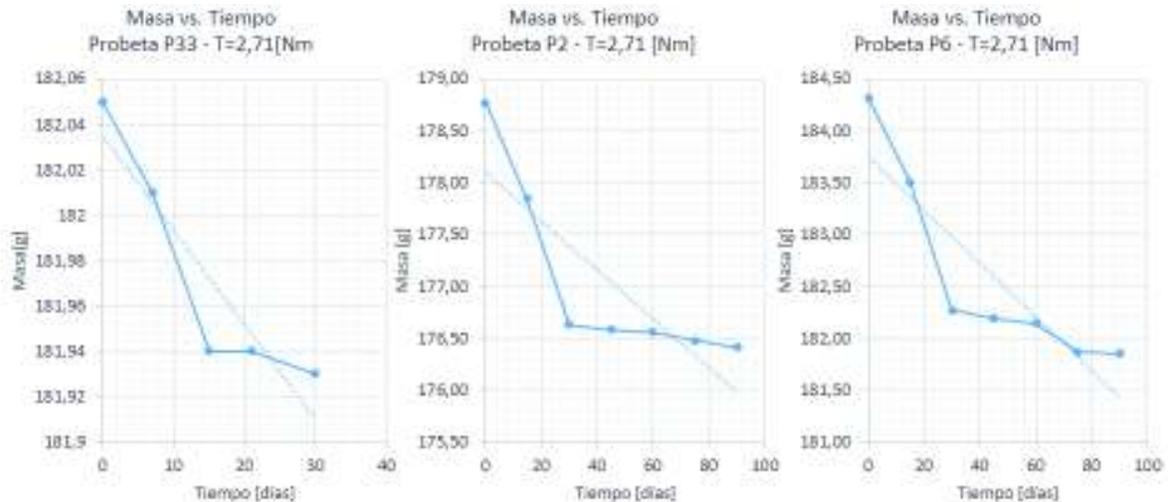


Figura 3. 17. Variación de la masa en las probetas con T=2,71 [Nm].

(Fuente: Propia, 2018)

La pérdida de masa es más apreciable durante los primeros 30 días, posterior a este tiempo este comportamiento tiende a ser disminuir, esto se debe a que la primera forma de corrosión presente en las muestras es uniforme o generalizada a lo largo y ancho de la superficie, y posterior a este se desarrolla la corrosión por picadura. De éstas, la segunda es más perjudicial, ya que no involucra una gran pérdida de material, pero puede convertirse en concentradores de esfuerzos (Liboria, 1999).

La **coloración desarrollada en la superficie** de las probetas, Figura 3.18., es característico del proceso de oxidación en las aleaciones de hierro. La coloración verde es oxidación por hidróxido de hierro I, coloración marrón en distintas tonalidades es hidróxido de hierro II y coloración en rojo oscuro es oxihidróxido de hierro III.

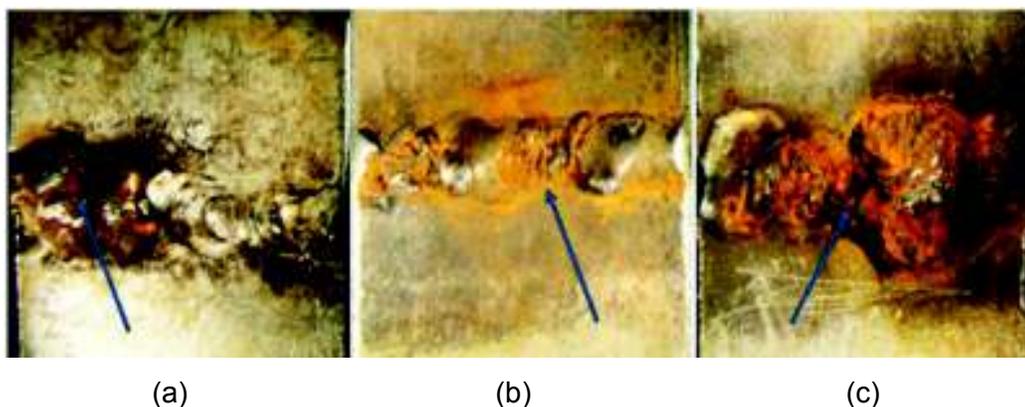


Figura 3.18. Coloración presenciada en las probetas, a) P3, b) P11 y C) P33 a 4X.

(Fuente: Propia, 2018)

La oxidación superficial de las probetas ensayadas (P3, P5, P6 y P11) ocurre en el MA y ZAC debido a las cargas constantes las cuales generan corrosión por tensión y desencadenando otros tipos de corrosión como se menciona en las págs. 63 y 64. Además el alto nivel de ferrita presente en el pase raíz ocasiona la disminución de la resistencia a la corrosión (Avesta, 2013).

La **velocidad de corrosión** se calcula cada 15 días para aquellas probetas que cumplieron 2160 horas de ensayo en ambiente corrosivo, y cada 7 días para las probetas que fueron expuestas por 720 horas al mismo ambiente corrosivo, los resultados se muestran en la Figura 3.19.

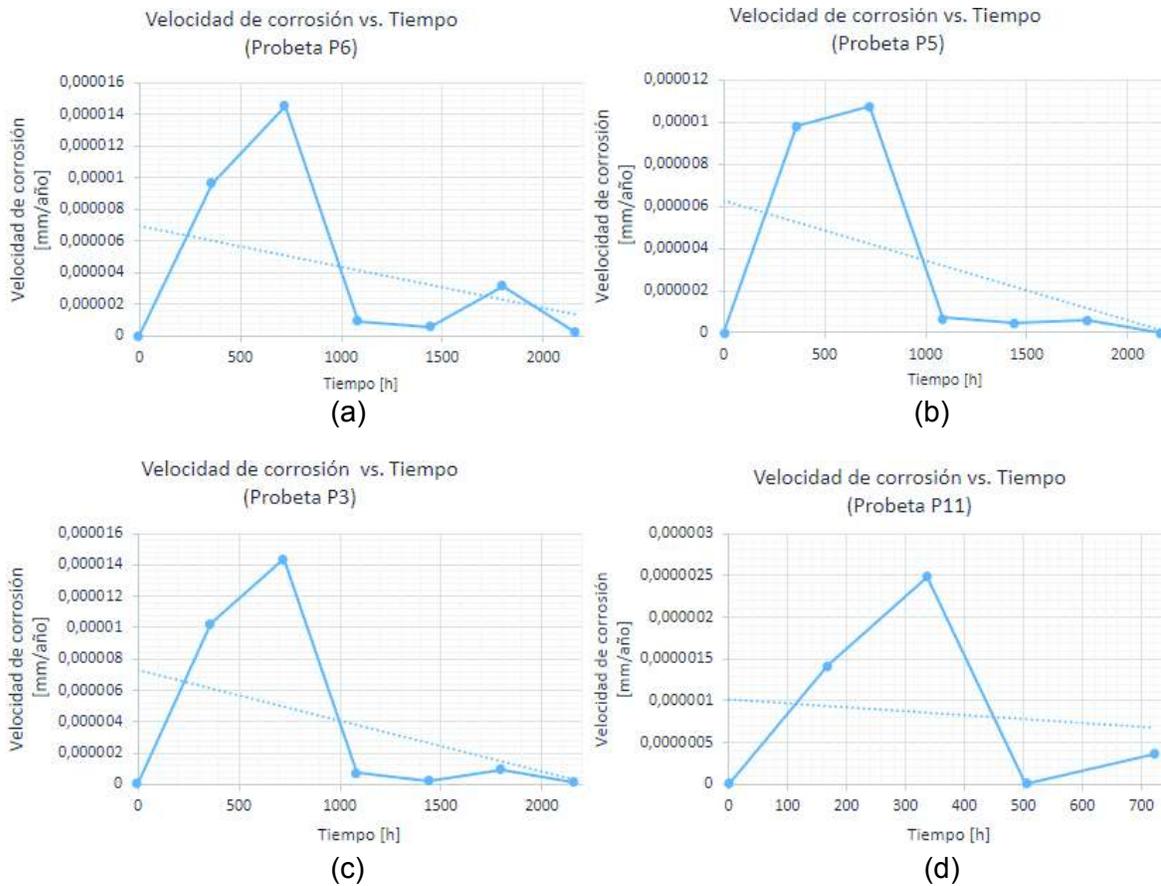


Figura 3. 19. Velocidad de corrosión para las probetas (a) P6 con  $T= 2,71$  [Nm], (b) P5 con  $T= 5,42$  [Nm] y (c) P3 con  $T=8,13$  [Nm] en un tiempo de 2160 horas de exposición y (d) P11 con  $T=8,13$  [Nm] en 720 horas de exposición.

(Fuente: Propia, 2018)

La velocidad de corrosión es directamente proporcional a la variación de masa teniendo que en los primeros 30 días ésta es más pronunciada y es donde se presenta los mayores valores, a partir de este tiempo la velocidad empieza a decrecer, esto se debe a que inicialmente la corrosión deteriora la capa pasiva (óxido de cromo) y a su vez genera una capa de óxido de hierro que actúa como recubrimiento disminuyendo la velocidad de corrosión hasta estabilizar el proceso (Pierre, 2000).

La velocidad de corrosión se encuentra en un rango de  $10^{-6}$  a  $10^{-5}$  [mm/año], lo cual indica que si existe un proceso corrosivo pero su valor es mínimo, si se compara con la estimada por APERAM (2013) que señala que éste acero (2205) presenta una velocidad de corrosión de 1,00 [mm/año] a la temperatura de 60°C y 0,40 [mm/año] a 24°C en diferentes ambientes corrosivos. Haciendo referencia a Múñez, Utrilla, Ureña, y Otero (2007), quienes señalan que los aceros inoxidable pueden presentar corrosión no apreciable a primera vista, pero pueden ser un problema en el futuro.

### 3.2.4. Discusión del análisis metalográfico

Las superficies sin ataque químico revelan desprendimiento de material en la zona del material de aporte (MA) que se evidencia como corrosión por picadura, debido a que el cordón de soldadura posee una capa protectora inferior a la del material base, evitando la repasivación en las aberturas y conduciendo a la perforación del material, como se aprecia en la Figura 3.20.

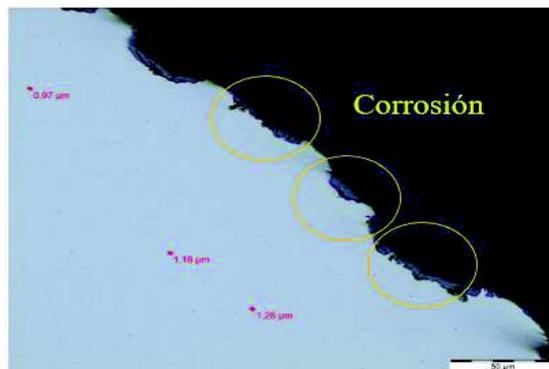


Figura 3.20. Desprendimiento de material en el borde del cordón (500X).

(Fuente: Propia, 2018)

En el estudio realizado por la empresa IMOA (2014), determina que la materia prima del acero dúplex presenta granos finos y alargados ver Figura 3.21. literal (a). Jiménez, Carsí, y Ruano (1998), indican que luego de un tratamiento térmico las microestructuras de granos alargados adquieren la forma de granos equiaxiales como se observa en la Figura 3.21. literal (b).

El material base objeto de éste estudio presenta granos alargados, pero no tan deformados como los que se observan en las Figuras 3.21. literal (a) y (b) lo que indica que este material ha sido laminado y ha recibido un tratamiento térmico previo como se observa en la Figura 3.21. literal (c).

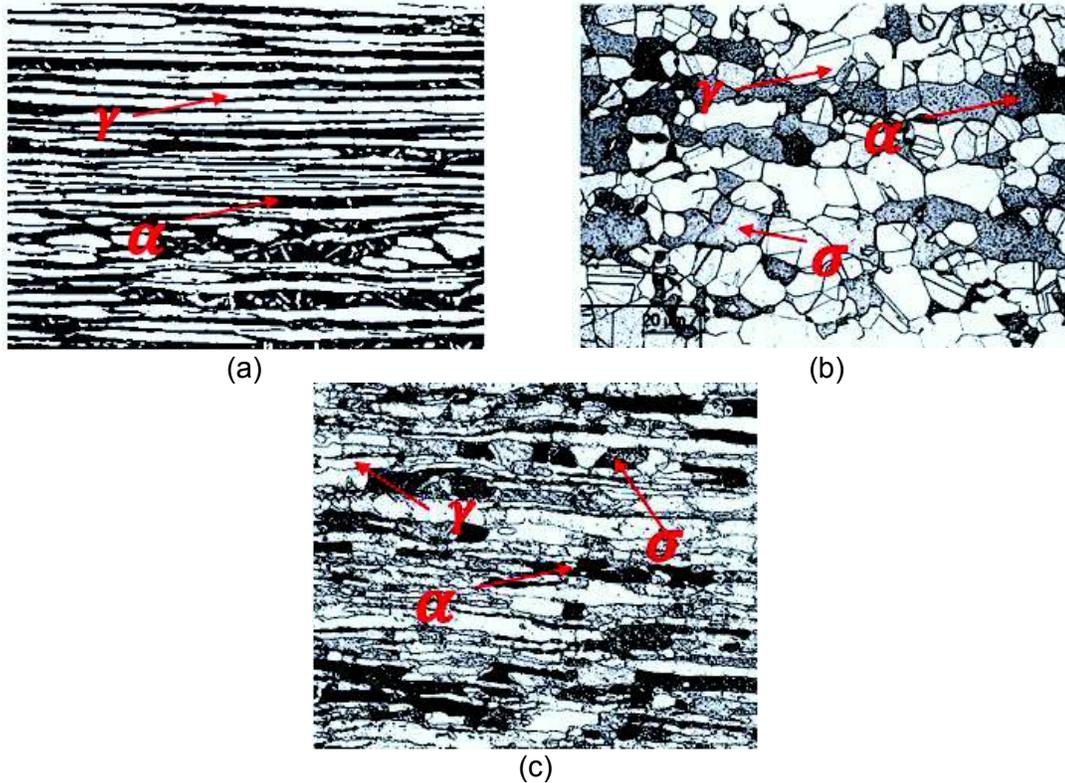


Figura 3.21. Microestructura del material base, (a) micrografía del material en la condición de entrega, (b) micrografía del material tratado térmicamente y (c) micrografía del material de investigación con efecto blanco negro (500X).

(Fuente: Propia, 2018)

En el **proceso de soldadura**, el material de aporte exhibe dos tipos de microestructura, una en el pase de raíz (primer pase) que presenta una mayor área de la fase ferrítica, Figura 3.22. literal (a), y el pase de terminación (cuarto pase) que presenta mayor área con fase austenítica, Figura 3.22. literal (b), dando como resultado la inestabilidad de las fases en el MA, este efecto puede deberse a la entrada de calor, velocidad de enfriamiento, o calor generado entre sus pases. Varios autores indican que:

- Este acero inoxidable dúplex presenta una microestructura de dos fases (austenítica-ferrítica) que es sensible a la entrada de calor durante el proceso de soldadura debido a la posible aparición de ferritización, es decir, aumento en el contenido de ferrita en el área de la ZAC que puede conducir a la pérdida de propiedades mecánicas y de corrosión (Jurga, Stojavoníc, & Ljubenkov).

- Una entrada de calor demasiado baja aumenta la velocidad de enfriamiento disminuyendo la formación de austenita, resultando en un alto contenido de ferrita que puede exceder el 65%, que es considerado el máximo para el acero dúplex 2205.(Avesta, 2013).
- El proceso de calentamiento durante la soldadura entre pases produce resultados no deseables en el cordón de soldadura, tales como: generación de tensiones residuales y/o distorsión, modificación de la estructura metalográfica (inestabilidad entre fases) y absorción de gases por el metal fundido (Blanco & Cepeda, 2015).

Entonces se tiene que la microestructura resultante del primer pase no es resultado del calor de entrada ya que presenta un valor dentro del rango recomendado, lo que afecta a su microestructura son los pases posteriores que generan tratamientos térmicos entre cada pase dando como resultado fases secundarias. Se evidencia un cambio en la microestructura laminar del acero dúplex al aproximarse a la ZAC apreciando que los granos de la fase ferrítica aumentan de tamaño, mientras que la fase austenítica tiende a ramificarse con morfologías de tipo Windmastätten.

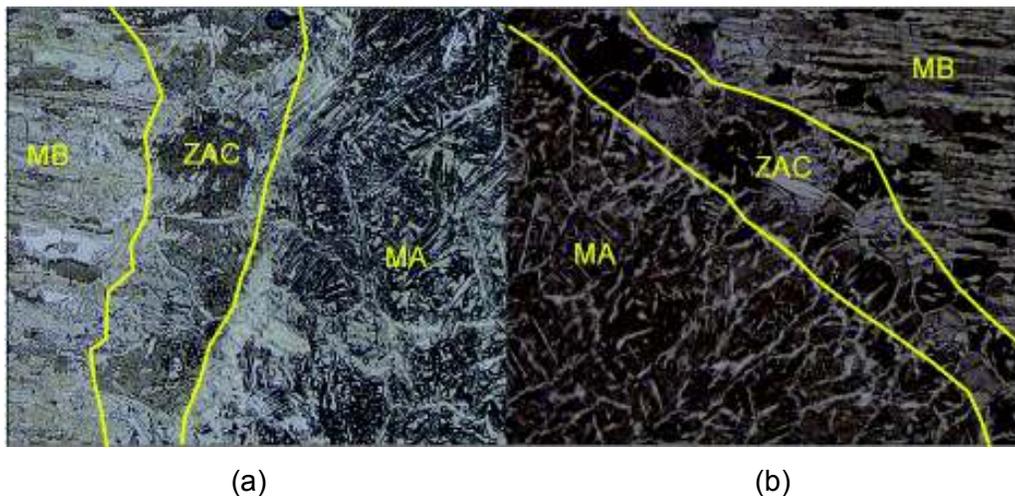


Figura 3.22. Microestructura de la probeta P5 (a) pase inicio y (c) pase de terminación a 100X, en la soldadura.

(Fuente: Propia, 2018)

De la investigación de Fargas, Anglada y Mateo (2002), Múñez, Utrilla, Ureña, y Otero (2007) y Gunn (1997), concluyen que las uniones soldadas presentan una microestructura diferente al acercarse a la unión ya que las láminas de austenita y ferrita van desapareciendo debido al crecimiento de granos a causa del proceso térmico, y en consecuencia se espera que las propiedades mecánicas cambien, ya que son dependientes de la dirección del grano.

Referente a las **fases secundarias** Herrera, Hurtado, Torres y Arizmendi (2016) mencionan que la composición química de los aceros dúplex los hace propensos a sufrir precipitación de fases secundarias y/o fases intermetálicas como la fase sigma ( $\sigma$ ), fase chi ( $\chi$ ), fase alfa prima ( $\alpha'$ ), carburos y nitruros, la mayoría tienden a fragilizar a las aleaciones dúplex, ocasionando efectos negativos en las propiedades del material.

Al comparar la microestructura del material de investigación, con los resultados expuestos por Giraldo, Patricia y Brandi (2007), Figura 3.23., y Medina, Rodríguez y Stella (2011), Figura 3.24., se tiene que el material desarrolló fases secundarias en la zona de la ZAC, entre las cuales se puede mencionar la fase alfa prima ( $\alpha$ ) y gama ( $\gamma$ ), propias del acero dúplex que identifican la fase ferrítica y austenítica respectivamente, además de la fase sigma ( $\sigma$ ), fase chi ( $\chi$ ), austenita secundaria ( $\gamma_2$ ), y widmanstätten, Figura 3.25., dando como resultado el cambio latente de las propiedades mecánicas y físicas de dicha zona.

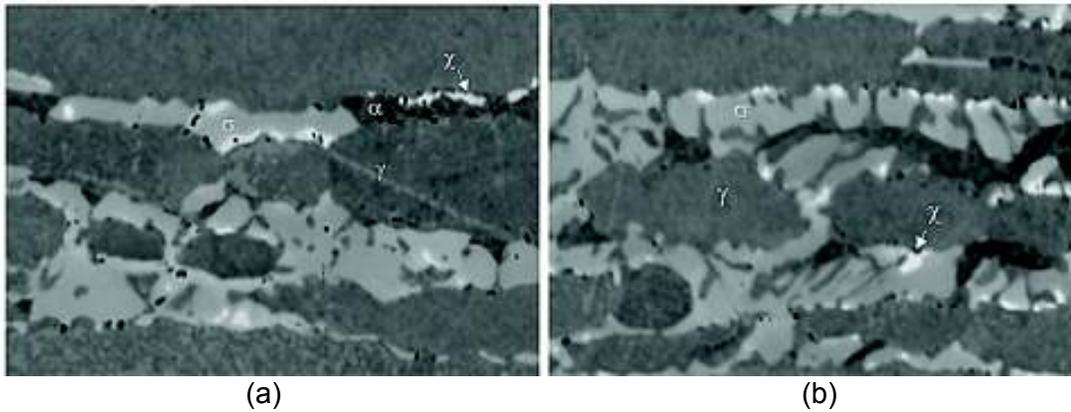


Figura 3.23. Micrográficas de los aceros tratados térmicamente a 850°C de un material a) UNS S32750 y b) UNS S32760 a 500X.

(Fuente: Giraldo, Patricia, & Brandi, 2007)

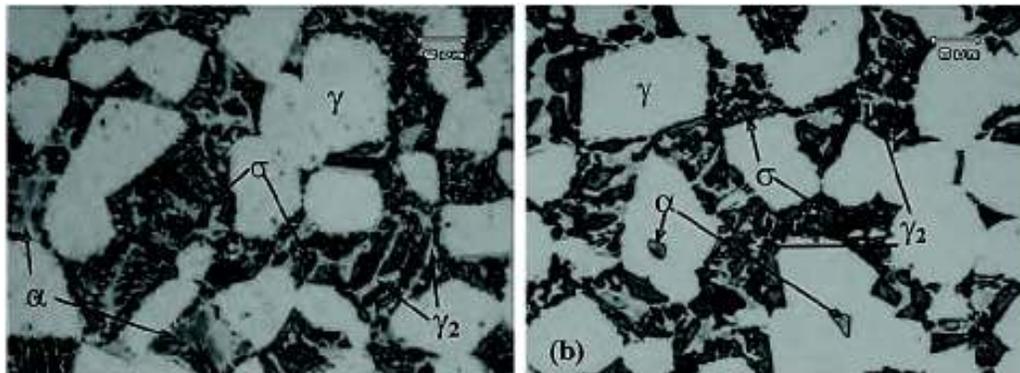


Figura 3.24. Fotomicrografías obtenidas por microscopía óptica de muestras de acero SAF 2507 tratadas a 850°C (500X).

(Fuente: Medina, Rodríguez, & Stella, 2011)

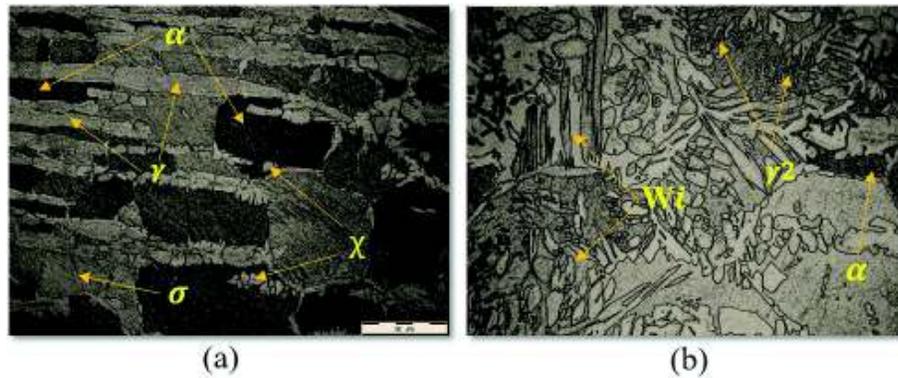


Figura 3.25. Microscopía de las probetas (a) P3 y (b) P5 a 500X.

(Fuente: Propia, 2018)

Las diferentes formas de **corrosión superficial** resultante del ensayo son comparadas con lo expuesto por Amaury (2006), Figura 3.26., las cuales son semejantes a las obtenidas en la investigación y expuestas en la Figura 3.27.

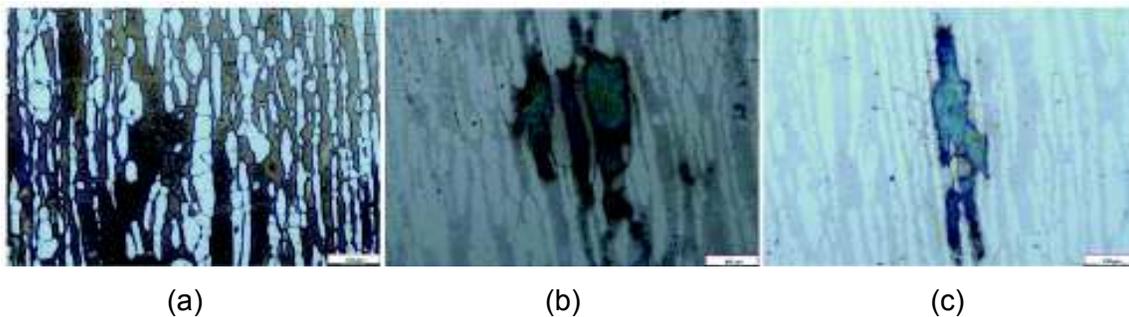


Figura 3.26. Corrosión afectando como: (a) ataque preferencial a la interface y disolución preferencial de la fase ferrítica, (b) y (c) morfología de las picaduras en C3F.

(Fuente: Amaury, 2006)

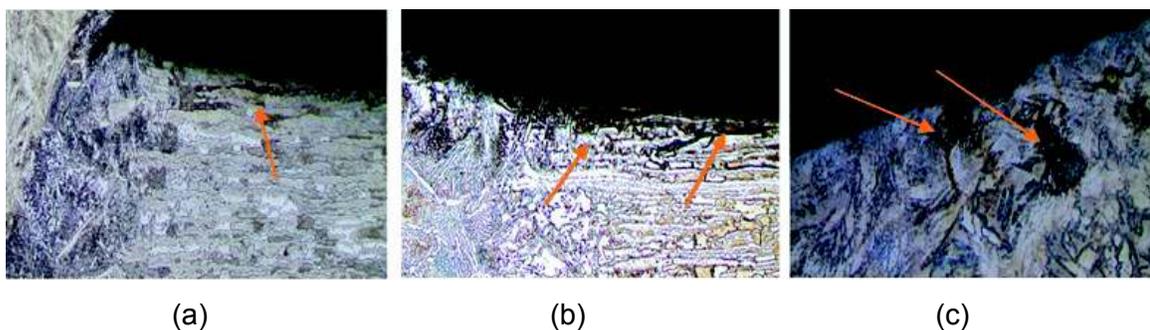


Figura 3.27. Proceso de corrosión suscitada en las probetas (a) P3, (b) P6 y (c) P5 a 500X.

(Fuente: Propia, 2018)

Por lo expuesto se distingue que las probetas de la presente investigación muestran ataque preferencial a la interface y disolución de la fase ferrítica, además de picaduras suscitadas en el borde del cordón de soldadura.

Otras formas de corrosión presentes en el MA son comparadas con lo expuesto por HILTI (2015), Figura 3.28., quien indica cómo se desarrolla la corrosión intergranular en la zona soldada, resultados que son similares a los que muestra la Figura 3.29., por lo que se verifica el desarrollo de éste tipo de corrosión en las probetas.

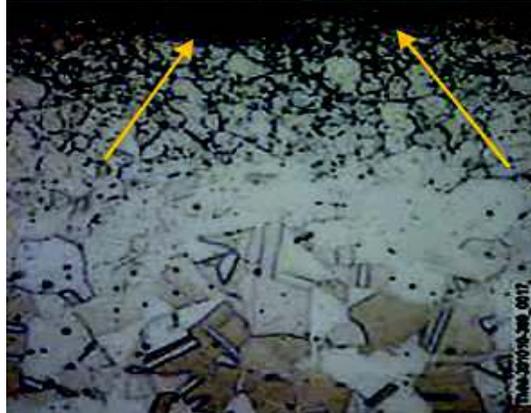


Figura 3.28. Micrografía de la corrosión intergranular en la zona soldada de un material 1.4401.  
(Fuente: HILTI, 2015)

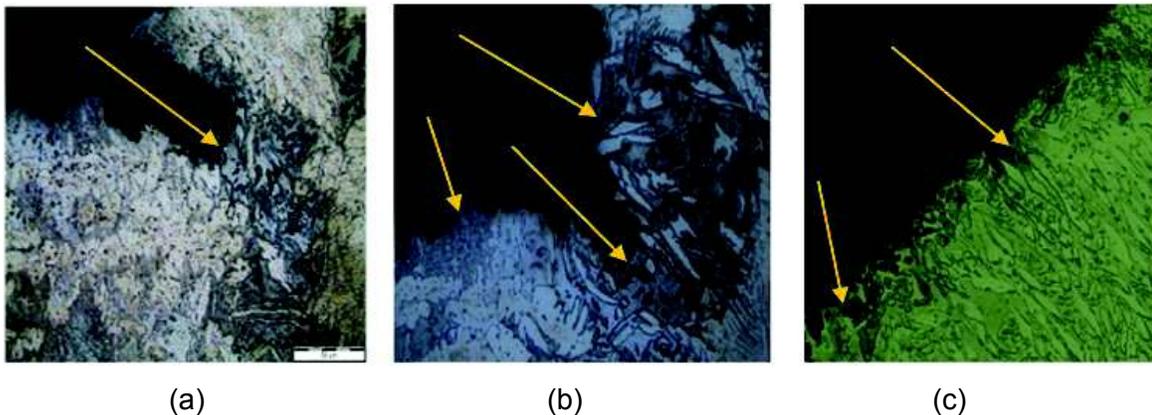


Figura 3.29. Resultados de la investigación en las probetas (a) P3, (b) P5 y (c) P6 a 500X.  
(Fuente: Propia, 2018)

En el cordón de soldadura se presenta una ZAC poco apreciable, esto es debido al alto punto de fusión que ofrece el acero inoxidable dúplex ( $1460^{\circ}\text{C}$ ) (APERAM, 2013), además el cordón de soldadura presenta socavaduras, escoria residual, contaminación de hierro y salpicaduras, Figura 3.30., a los cuales Avesta (2013) clasifica como defectos superficiales, Figura 3.31., y menciona que estos tienen consecuencias negativas sobre las propiedades mecánicas y la resistencia a la corrosión.

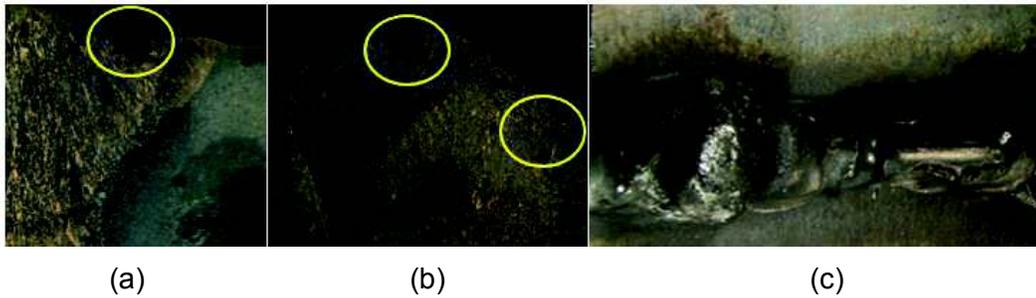


Figura 3.30. Resultados obtenidos en las probetas (a) P3, (b) P6 y (c) P5 a 4X.  
(Fuente: Propia, 2018)

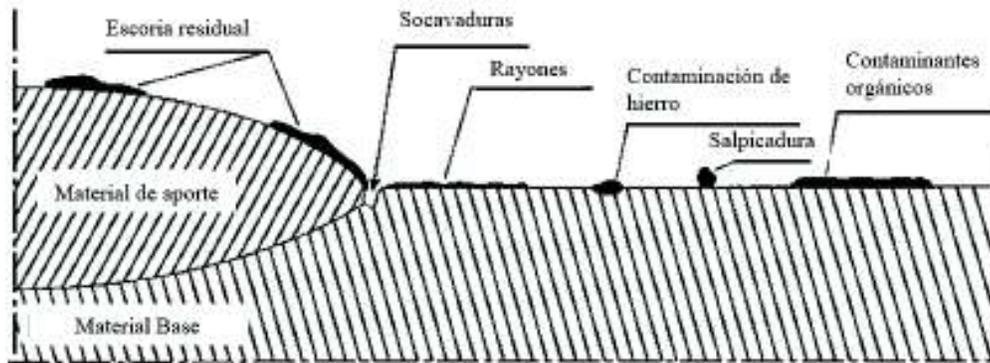


Figura 3.31. Defectos del proceso de soldadura.  
(Fuente: Avesta, 2013)

En relación a los torques aplicados, las muestras con mayor carga presentaron menos coloración superficial y mayor picadura como se observa en la Figura 3.32., debido a que el elemento sobrepasó el límite elástico lo que ocasionó su deformación permanente y la carga dejó de actuar como fuerza constante, generando celdas electroquímicas que actúan como ánodos con respecto a las áreas catódicas que actúan con menos esfuerzo facilitando la corrosión (Askeland , Fulay, & Wright, 2011), mientras que las probetas con menor carga presentaron mayor coloración superficial y menor desprendimiento de material, debido a que las cargas se mantienen constante ocasionando corrosión por tensión y corrosión uniforme.

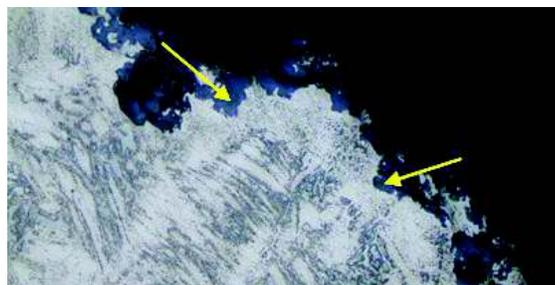


Figura 3.32. Picaduras en la metalografía de la probeta P3 a 500X.  
(Fuente: Propia, 2018)

### 3.2.5. Discusión del ensayo de microdureza

Las zonas Z1, Z2 y Z3 presentan una microdureza promedio de 265,55 HV, 242,18 HV, y 275,01 HV respectivamente, y algunos valores están por debajo del promedio a causa que el indentador cae fuera de la probeta, Figura 3.33. literal (a), o en una zona con coloración superficial (Pag.63) como se indica en la Figura 3.33. literal (b).

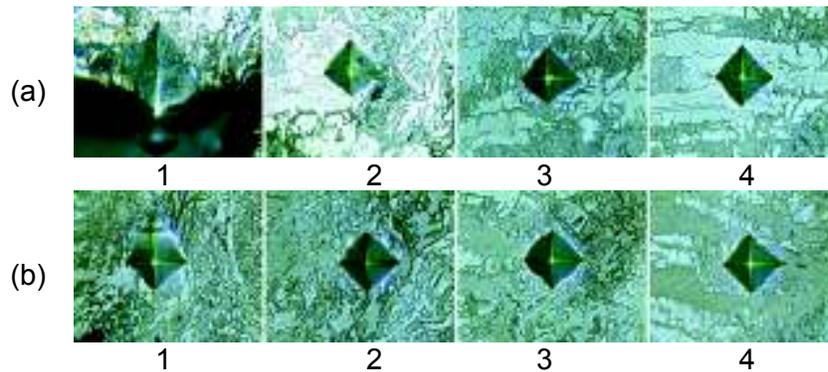


Figura 3.33. Marca del indentador en las probetas (a) P5, P11.

(Fuente: Propia, 2018)

Los mayores valores de dureza están en el rango de 292,22 HV a 301,17 HV, que caen en la fase austenítica como indica la Figura 3.34., teniendo en cuenta que la dureza de la austenita es de 200 HV (Kozlov, 1986), y la dureza del cordón de soldadura y zonas cercanas no debe exceder los 350 HV (Hudok, 1990), por lo tanto las medidas de microdureza son aprobadas.

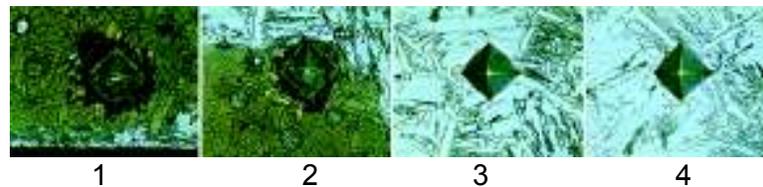


Figura 3.34. Marca del indentador en la probeta P5 a 500X.

(Fuente: Propia, 2018)

Los mayores valores de microdureza de la zona Z4 son: 268,37 HV en el MB, 260,09 HV en la ZAC y 265,83 HV en MA, los cuales guardan similitud con los obtenidos por Luo, Li, y Wang (2014) que obtienen microdurezas de 240 HV a 250 HV en el MB, 280 HV en la ZAC y 275 HV en el MA. Obteniendo así, la aprobación del ensayo en la zona Z4.

El ensayo de microdureza demuestra que la superficie de las probetas está siendo afectada debido a la corrosión existente, la cual tiene consecuencias negativas en las propiedades mecánicas del acero.

### 3.2.6. Discusión del ensayo de dureza

De los resultados obtenidos en los ensayos de dureza se obtiene un promedio de cada zona como muestra la Figura 3.35.



Figura 3. 35. Promedio de las durezas HRC, resultantes de las diferentes zonas.

(Fuente: Propia, 2018)

El ensayo de dureza realizado a las probetas P3, P5 y P6 muestran valores de 16 y 20 HRC los cuales son inferiores a los reportados por Jaramillo - Martínez (2017) y Lazaro (2010) quienes obtuvieron valores en el orden de 21 a 24 HRC

El MA y el MB tienen una tenacidad baja debido a un contenido de austenita insuficiente denominado ferritización excesiva (Hudok, 1990), como muestra la Figura 3.36., e inclusiones indeseables que pueden causar el deterioro de las propiedades mecánicas y la resistencia a la corrosión en zonas cercanas al ZAC, como indica la Figura 3.37.

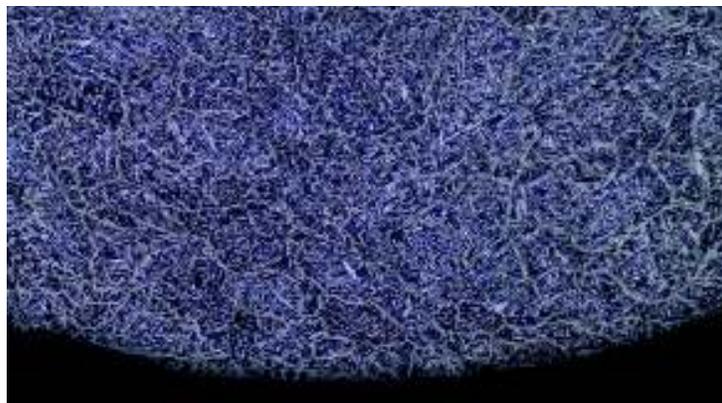


Figura 3. 36. Metalografía del pase raíz de la probeta P5 a 500X.

(Fuente: Propia, 2018)

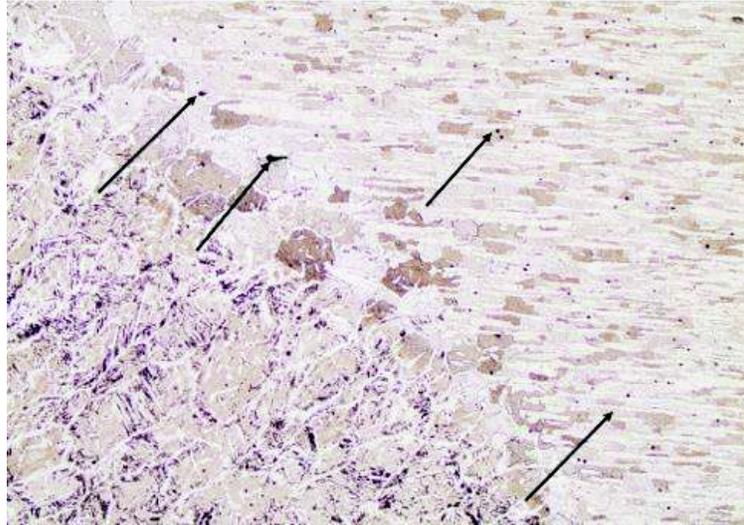


Figura 3. 37. Metalografía de inclusiones presentadas en zonas cercanas al ZAZ (P6 a 100X).

(Fuente: Propia, 2018)

### **3.2.7. Discusión del ensayo de microscopía electrónica de barrido EDS**

Mediante el ensayo de microscopía electrónica de barrido realizado en un punto de la superficie, se verifica la presencia de cromo en un 20.36 %, el cual es menor a lo estipulado en la ASTM-A790 (2017), indicando que debe estar en el rango de 22 a 23 % Cr, pero guarda relación con lo indica por la empresa Avesta (2013) que indica que en la superficie soldada se desarrolla una capa de óxido con reducción de cromo. Por lo mencionado y de los resultados de la velocidad de corrosión se puede concretar que el proceso del deterioro del material se está desarrollando.

### **3.2.8. Discusión del medio corrosivo**

El medio ambiente (solución salina + cloro) al cual fueron expuestas las probetas de ensayo favoreció al deterioro de las mismas, permitiendo demostrar la reducción de la resistencia a la corrosión.

La agresividad de este medio tiene lugar cuando entra en contacto con el acero debido a que contiene abundancia de cloruros y cloruro de sodio; el conjunto de estos elementos más algunos factores de orden químico, físico y biológico contribuyen a que en el acero se produzca reacciones químicas y electroquímicas que deterioran al material las cuales no son cuantificables, además los iones de cloro facilitan las picaduras al promover la ruptura de la capa pasivadora del acero dúplex en áreas localizadas (Soto, 2013).

### 3.2.9. Discusión general

De los resultados obtenidos por el ensayo de tracción se indica que el material trabajado es un acero inoxidable dúplex 2205 laminado en frío y recocido, al ser la tubería del mismo lote utilizado en el estudio realizado por Jaramillo-Martínez (2017), entonces presenta la misma composición química. Para aprobar la calidad del proceso de soldadura se tiene en cuenta dos factores: el calor de entrada y los valores de doblado guiado, los cuales están dentro de lo aconsejado por otros estudios realizados en este tipo de aceros.

Del ensayo de corrosión acelerada los resultados de variación de masa y velocidad de corrosión son muy apreciables en los primeros 30 días de estudio esto se debe a la existencia de corrosión uniforme, deterioro de la capa pasiva (óxido de cromo). La mayor concentración de óxido de hierro (coloración superficial) se presentó en la raíz de la soldadura debido a cargas constantes que generaron corrosión por tensión y esta da lugar a la formación de otros tipos de corrosión.

El análisis metalográfico reveló una microestructura del material base con tratamiento térmico, y un proceso de soldadura donde se desarrollaron fases secundarias (fase sigma, fase chi y austenita secundaria) que afectan de manera directa a las propiedades mecánicas del material soldado, además éstas fases secundarias pueden conducir a un proceso de corrosión por picadura. Otros factores que son aportantes a los procesos de corrosión son los defectos que se presentan en la soldadura, pues varios actúan como concentradores de esfuerzos y captadores de corrosión local, ya que pueden retener partículas de materiales, fluidos y/o bacterias dependiendo del medio en que trabaje.

De acuerdo a la dirección en que se realizó la toma de medidas de microdureza vickers, estas revelaron que la superficie está siendo afectada por la corrosión existente, ya que el indentador cae sobre zonas que presentaban una coloración café oscura resultando en pequeñas variaciones en la toma de medidas, además se constata que los mayores valores se obtienen en la fase austenítica.

De la misma forma el ensayo de dureza indicó que los resultados son un tanto menores en comparación de investigaciones anteriores, debido a que la microestructura presenta inclusiones, ferritización del material de aporte y fases secundarias en la ZAC.

Finalmente, mediante el ensayo de microscopía electrónica de barrido se verifica la presencia de cromo, siendo menor a lo estipulado en la ASTM-A790 (2017), lo que posiblemente indique una carencia superficial de este elemento.

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1. Conclusiones

- En el presente estudio se lograron cumplir los objetivos planteados en el proyecto de titulación.
- Las muestras con menor torque (carga) demostraron que no pasaron el límite elástico ya que recuperaron su forma original al retirarlas del portaprobetas, manteniendo así una carga constante aplicada a la muestra.
- Cuando el torque aplicado a la probeta es de 2,71 [Nm] se presenta una velocidad de corrosión y desprendimiento de material mayor en un 19,05 % a aquellas probetas que se encuentran cargadas a 5,41 [Nm] y 8,13 [Nm]. Esto se debe a que las muestras con menor carga generan más esfuerzos residuales y constantes en el centro de la probeta (MA y ZAC).
- La coloración aglomerada en el centro de la muestra (MA y ZAC) es resultado de las cargas aplicadas a las probetas y el fluido de trabajo, que propician que se tenga una corrosión por tensión.
- El porcentaje en peso de cromo y níquel obtenidos en la ZAC del ensayo de microscopía electrónica confirman que en este punto posiblemente se tiene una reducción de resistencia a la corrosión.
- El cordón de soldadura presenta defectos a causa del proceso, tales como: socavaduras, escoria residual y salpicaduras, siendo estas discontinuidades precursoras de un proceso corrosivo ya que pueden retener fluidos o desechos no deseables que produzcan reacciones químicas perjudiciales para la capa pasiva del acero.
- A través del análisis metalográfico fue posible observar el desarrollo de la corrosión general, por picadura e intergranular, presentando indicios principalmente en el borde del MA y ZAC, ya que la variación de temperatura en el proceso de soldadura ocasiona un tratamiento térmico dando como resultado fases secundarias indeseables.

## 4.2. Recomendaciones

Es aconsejable regular y controlar los parámetros del proceso, mediante especificaciones de los fabricantes y/o manuales del material base, por ser uno de los precursores del proceso acelerado de corrosión.

Controlar las velocidades de enfriamiento entre cada pase de soldadura, para la formación apropiada de austenita e impedir precipitaciones perjudiciales, de esta manera se mantendrá el balance de las fases, evitando cambios sobre las propiedades mecánicas y físicas.

Se recomienda utilizar como gas de protección en la soldadura mezclas con nitrógeno, por sus propiedades físicas que permite mantener más estable las fases de austenita y ferrita, evitando la generación descontrolada de la ferrita en la raíz del cordón de soldadura.

Se debe elegir un acero inoxidable de acuerdo a la aplicación o trabajo que se vaya a realizar, considerando los siguientes factores: ambiente de corrosión, concentración de pH, temperatura de servicio, contenido de impurezas, presencia de óxido en la soldadura, tratamientos térmicos presentados en la soldadura, grietas y cloración del agua. Además, tomar en cuenta la actividad microbiana que se podría aglomerar en el cordón de soldadura dando lugar a algún tipo de corrosión, impidiendo la regeneración de la capa pasiva de los aceros inoxidables provocando una corrosión acelerada.

## Referencias Bibliográficas

- [1] Álvarez-Armas I., y Degallaix -Moreuil, S. (2013). Duplex stainless steels. Jhon Wiley and Sons.
- [2] Amaury, C. (2006). Efectos de los tratamientos térmicos en la resistencia a la corrosión de un acero duperdúplex. Obtenido de [www.hdl.handle.net/2099.1/3229](http://www.hdl.handle.net/2099.1/3229)
- [3] APERAM. (2013). Stainless steel and corrosion. Obtenido de [www.aperam.com](http://www.aperam.com)
- [4] APV. (2008). Corrosion Handbook. SPX.
- [5] Askeland, D., Fulay, P., & Wright, W. (2011). Ciencia e ingeniería de materiales. México: Cengage Learning.
- [6] ASME IX. (2010). Qualification Standard for Welding and Brazing Procedures, Welders, Brazers, and Welding and Brazing Operators. International Code.
- [7] ASTM A790. (2018). Standar Specification for Seamless and Welded Ferritic/Austenitic Stainless Steel Pipe. ASTM International. Obtenido de [www.astm.org](http://www.astm.org)
- [8] ASTM B117-16. (2016). Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus. Obtenido de ASTM Internacional, West Conshohocken: [www.astm.org](http://www.astm.org)
- [9] ASTM E8/E8M-09. (2009). Standard Specification for Reagent Water. Obtenido de ASMT International, West Conshohocken: [www.astm.org](http://www.astm.org)
- [10] Avesta, W. (2013). Practice and products for stainless steel welding. The AVESTA WELDING MANUAL.
- [11] Blanco, O., & Cepeda, E. (2015). Efecto de la variación de temperatura entre pases en el acero al carbono ASTM A106 GRADO B. Bogotá: D.C.
- [12] Dorta Almenara, M., Rosales, A., Vidal, A., Muñoz, P., & Payares, M. (2009). Influencia de soldaduras SAW sobre la resistencia a la corrosión de aceros dúplex 2205. Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales. doi:289-296
- [13] Dos Santos, V., Sevilla, C., Tisoy, L. (2012). EXPOSICIÓN ENSAYOS DE CORROSIÓN. Universidad Panamericana del Puerto. Obtenido de [www.ws.slideshare.net](http://www.ws.slideshare.net)
- [14] Fargas, G., Anglada, M., & Mateo, A. (2002). Influencia de las fases intermetálicas en la conformación de los aceros inoxidables dúplex. Universidad Politécnica de Catalunya.
- [15] Fulcer, J. (2008). Todo lo que usted siempre quiso saber sobre TIG (GTAW). Obtenido de BAW Buenos Aires Weldion S.R.L.: [www.baw.com.ar](http://www.baw.com.ar)
- [16] Garin, J., Mannhein, R., & Camus, M. (2010). Estudio sobre disolución de fase sigma en un acero dúplex S31803. Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, 46-53.

- [17] Giraldo, S., Patricia, C., & Brandi, D. (2007). Precipitación de fases intermetálicas de aceros inoxidable dúplex sometidos a tratamientos térmicos a temperatura de 850C (Vol. 13). (36, Ed.) Scientia Et Technical.
- [18] Gunn, R. N. (1997). Duplex stainless steels: microstructure, properties and applications. Woodhead Publishing.
- [19] Herrera, M., Hurtado, E., Torres, D., & Arizmendi, A. (2016). Identificación de fases y precipitados por MFA en uniones de acero inoxidable dúplex. Artículos Científicos . Obtenido de [www.dx.doi.org/10.1590/0104-9224/SI2102.13](http://www.dx.doi.org/10.1590/0104-9224/SI2102.13)
- [20] HILTI, C. (2015). Corrosion handbook, 9494 Schaun. Obtenido de Liechtenstein: [www.hilti.com](http://www.hilti.com)
- [21] Hudok, D. (1990). Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys. Metals Handbook.
- [22] IMO. (2014). Practical guidelines for the fabrication of duplex stainless steels (Third edition ed.). ISBN 978-1-907470-09-76.
- [23] ITEA. (s.f.). Instituto Técnico de la Estructura en acero, ESDEP TPM 22. Obtenido de [www.webacero.net/ingenieria/estructuras/metallica/bibliografia/fiadocumentation/itea/TOMO22.pdf](http://www.webacero.net/ingenieria/estructuras/metallica/bibliografia/fiadocumentation/itea/TOMO22.pdf)
- [24] Jaramillo, M., & Martínez, F. (2017). Estudio y caracterización microestructural de la soldadura realizada mediante proceso GTAW en tuberías de acero dúplex 2205 en posición 6G. Escuela Politécnica Nacional.
- [25] Jiménez, J., Carsí, M., & Ruano, O. (1998). Caracterización y propiedades mecánicas a alta temperatura de un acero inoxidable dúplex. Curso Superior de Investigación Científicas. Obtenido de [www.revistademetalurgia.revistas.csic.es](http://www.revistademetalurgia.revistas.csic.es)
- [26] Jurga, I., Stojavoníc, I., & Ljubenkov, B. (s.f.). Experimental research of the duplex stainless steel welds in shipbuilding (Vol. 65). doi:ISSN 0007-215X
- [27] Kozlov, Y. (1986). Ciencia de los materiales. Moscú.
- [28] Lazaro, J. (2010). Estudio de la resistencia a la corrosión y microestructural en la soldadura del acero dúplex 2205. UNI.
- [29] Liboria, M. (1999). Corrosión atmosférica. México: Plaza y Valdes.
- [30] Luo, J., Li, L., & Wang, X. (2014). Microstructure of 2205 duplex stainless steel joint in submerged arc welding by post weld heat treatment. Journal of Manufacturing Processes.
- [31] Medina, N., Rodríguez, E., & Stella, J. (2011). Caracterización microestructural de la precipitación y disolución de las fases sigma en el acero SAF 2507 (4 ed., Vol. 26). Revista UCV.
- [32] Múnez, C.J., Utrilla, M.V., Ureña, A., y Otero, E. (2007). Influencia del material de aporte en la resistencia a corrosión por picadura en uniones soldadas de un acero inoxidable dúplex 2205. Revista de metalurgia, 245-251.
- [32] Pierre, R. (2000). Handbook of Corrosion Engineering. Washinton D.C.: McGraw-Hill.

- [33] Quintero. (2002). Estudio y caracterización de un acero inoxidable dúplex 2205 soldado por arco de plasma a través de la técnica "ojo de cerradura". Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- [34] Ramírez, A. (2006). Soldadura de un acero inoxidable dúplex 2205 por el proceso de soldadura GTAW. Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, 43-50.
- [35] Santander. (2008). Estudio experimental de corrosión en metales de uso industrial por Desulfuricans. Obtenido de Santiago de Chile: [www.tesis.uchile.cl](http://www.tesis.uchile.cl)
- [36] Soto, C. (2013). Estudio de corrosión en acero inoxidable AISI 316 en soluciones cloradas. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- [37] Szyndelman, G. (2008). Comportamiento tribológico del acero inoxidable dúplex 2205.
- [38] Uhlig. (2011). Uhlig's corrosion handbook. John Wiley and Sons.
- [39] V, Dos Santos; Sevilla, C; Tisoy, L. (2012). Exposición ensayos de corrosión. Obtenido de Universidad Panamericana del Puerto: [es.slideshare.net](http://es.slideshare.net)

## **Anexos**

### **ANEXO I.**

#### **PROPIEDADES DEL ACERO INOXIDABLE DÚPLEX 2205**

El siguiente anexo cita de la norma ASTM A790 la composición química y las propiedades física-mecánicas del acero inoxidable dúplex 2205.

 **A790/A790M – 17**

**TABLE 2 Chemical Requirements<sup>a</sup>**

UNS Designation <sup>d</sup>	Type <sup>c</sup>	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	N	Cu	Others
S31200		0.030	2.00	0.045	0.030	1.00	5.5–6.5	24.0–26.0	1.20–2.00	0.14–0.20	...	...
S31280		0.030	1.00	0.030	0.030	0.75	5.5–7.5	24.0–26.0	2.5–3.5	0.10–0.30	0.20–0.80	W 0.10–0.50
S31500		0.030	1.20–2.00	0.030	0.030	1.40–2.00	4.2–5.2	18.0–19.0	2.50–3.00	0.05–0.10	...	...
S31803		0.030	2.00	0.030	0.020	1.00	4.5–6.5	21.0–23.0	2.5–3.5	0.08–0.20	...	...
S32003		0.030	2.00	0.030	0.020	1.00	3.0–4.0	19.5–22.5	1.50–2.00	0.14–0.20	...	...
S32101		0.040	4.0–6.0	0.040	0.030	1.00	1.35–1.70	21.0–22.0	0.10–0.80	0.20–0.25	0.10–0.80	...
S32202		0.030	2.00	0.040	0.010	1.00	1.00–2.80	21.5–24.0	0.45	0.18–0.26	...	...
S32205	2205	0.030	2.00	0.030	0.020	1.00	4.5–6.5	22.0–23.0	3.0–3.5	0.14–0.20	...	...
S32304	2304	0.030	2.50	0.040	0.040	1.00	3.0–5.5	21.5–24.5	0.05–0.60	0.05–0.20	0.05–0.60	...
S32506		0.030	1.00	0.040	0.015	0.90	5.5–7.2	24.0–26.0	3.0–3.5	0.08–0.20	...	W 0.05–0.30
S32520		0.030	1.5	0.035	0.020	0.80	5.5–8.0	24.0–26.0	3.0–5.0	0.20–0.35	0.5–3.00	...
S32550	255	0.04	1.50	0.040	0.030	1.00	4.5–6.5	24.0–27.0	2.9–3.9	0.10–0.25	1.50–2.60	...
S32707		0.030	1.50	0.035	0.010	0.50	5.5–9.5	26.0–29.0	4.0–5.0	0.30–0.50	1.0	Co 0.5–2.0
S32750 <sup>d</sup>	2507	0.030	1.20	0.035	0.020	0.80	6.0–8.0	24.0–26.0	3.0–5.0	0.24–0.32	0.5	...
S32780 <sup>e</sup>		0.030	1.00	0.030	0.010	1.00	6.0–8.0	24.0–26.0	3.0–4.0	0.20–0.30	0.50–1.00	W 0.50–1.00
S32808		0.030	1.10	0.030	0.010	0.50	7.0–8.2	27.0–27.9	0.80–1.20	0.30–0.40	...	W 2.10–2.50
S32900	329	0.08	1.00	0.040	0.030	0.75	2.5–5.0	23.0–28.0	1.00–2.00	...	...	...
S32906		0.030	0.80–1.50	0.030	0.030	0.80	5.8–7.5	28.0–30.0	1.50–2.60	0.30–0.40	0.80	...
S32950		0.030	2.00	0.035	0.010	0.80	3.5–5.2	26.0–29.0	1.00–2.50	0.15–0.35	...	...
S33207		0.030	1.50	0.035	0.010	0.80	6.0–9.0	29.0–33.0	3.0–5.0	0.40–0.60	1.0	...
S39274		0.030	1.00	0.030	0.020	0.80	6.0–8.0	24.0–26.0	2.5–3.5	0.24–0.32	0.20–0.80	W 1.50–2.50
S39277		0.025	0.80	0.025	0.002	0.80	6.5–8.0	24.0–26.0	3.0–4.0	0.23–0.33	1.20–2.00	W 0.8–1.2
S81921		0.030	2.00–4.00	0.040	0.030	1.00	2.00–4.00	19.0–22.0	1.00–2.00	0.14–0.20	...	...
S82011		0.030	2.0–3.0	0.040	0.020	1.00	1.00–2.00	20.5–23.5	0.10–1.00	0.15–0.27	0.50	...
S82121	...	0.035	1.00–2.50	0.040	0.010	1.00	2.00–4.00	21.0–23.0	0.30–1.30	0.15–0.25	0.20–1.20	...
S82441		0.030	2.5–4.0	0.035	0.005	0.70	3.0–4.5	23.0–26.0	1.00–2.00	0.20–0.30	0.10–0.80	...
S83071	...	0.030	0.50–1.50	0.030	0.020	0.50	6.0–8.0	29.0–31.0	3.0–4.0	0.28–0.40	0.80	...

<sup>a</sup>Maximum, unless a range or minimum is indicated. Where ellipses (...) appear in this table, there is no minimum and analysis for the element need not be determined or reported.

<sup>b</sup>New designation established in accordance with Practice E527 and SAE J 1086.

<sup>c</sup>Common name, not a trademark, widely used, not associated with any one producer. 329 is an AISI number.

<sup>d</sup>% Cr + 3.3 × % Mo + 16 × % N ≥ 41.

<sup>e</sup>% Cr + 3.3 × % Mo + 16 × % N ≥ 40.

**TABLE 3 Tensile and Hardness Requirements**

UNS Designation	Type <sup>A</sup>	Tensile Strength, min, ksi [MPa]	Yield Strength, min, ksi [MPa]	Elongation in 2 in. or 50 mm, min, %	Hardness, max	
					HBW	HRC
S31200		100 [690]	65 [450]	25	280	...
S31260		100 [690]	65 [450]	25	...	...
S31500		92 [630]	64 [440]	30	290	30
S31803		90 [620]	65 [450]	25	290	30
S32003						
t ≤ 0.187 in. [5.00 mm]		100 [690]	70 [485]	25	290	30
t > 0.187 in. [5.00 mm]		95 [655]	65 [450]	25	290	30
S32101						
t ≤ 0.187 in. [5.00 mm]		101 [700]	77 [530]	30	290	...
t > 0.187 in. [5.00 mm]		94 [650]	65 [450]	30	290	...
S32202		94 [650]	65 [450]	30	290	30
S32205	2205	95 [655]	65 [450]	25	290	30
S32304	2304	87 [600]	58 [400]	25	290	30
S32506		90 [620]	65 [450]	18	302	32
S32520		112 [770]	80 [550]	25	310	...
S32550	255	110 [760]	80 [550]	15	297	31
S32707		133 [920]	101 [700]	25	318	34
S32750	2507	116 [800]	80 [550]	15	300	32
S32760 <sup>B</sup>		109 [750]	80 [550]	25	310	32
S32808						

**TABLE X1.1 Dimensions of Welded and Seamless Stainless Steel Pipe**

Note 1—The decimal thickness listed for the respective pipe sizes represents their nominal or average wall dimensions.

NPS Designator	Outside Diameter		Nominal Wall Thickness							
	in.	mm	Schedule 5S <sup>A</sup>		Schedule 10S <sup>A</sup>		Schedule 40S		Schedule 80S	
			in.	mm	in.	mm	in.	mm	in.	mm
1/8	0.405	10.29	...	...	0.049 <sup>B</sup>	1.24	0.088	1.73	0.095	2.41
1/4	0.540	13.72	...	...	0.065 <sup>B</sup>	1.65	0.088	2.24	0.119	3.02
3/8	0.675	17.15	...	...	0.065 <sup>B</sup>	1.65	0.091	2.31	0.126	3.20
1/2	0.840	21.34	0.065 <sup>B</sup>	1.65	0.083 <sup>B</sup>	2.11	0.109	2.77	0.147	3.73
3/4	1.050	26.67	0.065 <sup>B</sup>	1.65	0.083 <sup>B</sup>	2.11	0.113	2.87	0.154	3.91
1.0	1.315	33.40	0.065 <sup>B</sup>	1.65	0.109 <sup>B</sup>	2.77	0.133	3.38	0.179	4.55
1 1/4	1.660	42.16	0.065 <sup>B</sup>	1.65	0.109 <sup>B</sup>	2.77	0.140	3.56	0.191	4.85
1 1/2	1.900	48.26	0.065 <sup>B</sup>	1.65	0.109 <sup>B</sup>	2.77	0.145	3.68	0.200	5.08
2	2.375	60.33	0.065 <sup>B</sup>	1.65	0.109 <sup>B</sup>	2.77	0.154	3.91	0.218	5.54
2 1/2	2.875	73.03	0.083	2.11	0.120 <sup>B</sup>	3.05	0.203	5.16	0.276	7.01
3	3.500	88.90	0.083	2.11	0.120 <sup>B</sup>	3.05	0.216	5.49	0.300	7.62
3 1/2	4.000	101.60	0.083	2.11	0.120 <sup>B</sup>	3.05	0.226	5.74	0.318	8.08
4	4.500	114.30	0.083	2.11	0.120 <sup>B</sup>	3.05	0.237	6.02	0.337	8.56
5	5.563	141.30	0.109 <sup>B</sup>	2.77	0.134 <sup>B</sup>	3.40	0.258	6.55	0.375	9.52
6	6.625	168.28	0.109	2.77	0.134 <sup>B</sup>	3.40	0.280	7.11	0.432	10.97
8	8.625	219.08	0.109 <sup>B</sup>	2.77	0.148 <sup>B</sup>	3.78	0.322	8.18	0.500	12.70
10	10.750	273.05	0.134 <sup>B</sup>	3.40	0.165 <sup>B</sup>	4.19	0.365	9.27	0.500 <sup>B</sup>	12.70 <sup>B</sup>
12	12.750	323.85	0.156 <sup>B</sup>	3.96	0.180 <sup>B</sup>	4.57	0.375 <sup>B</sup>	9.52 <sup>B</sup>	0.500 <sup>B</sup>	12.70 <sup>B</sup>
14	14.000	355.60	0.156 <sup>B</sup>	3.96	0.188	4.78	...	...	...	...
16	16.000	406.40	0.165 <sup>B</sup>	4.19	0.188	4.78	...	...	...	...
18	18.000	457.20	0.165 <sup>B</sup>	4.19	0.188	4.78	...	...	...	...
20	20.000	508.00	0.188 <sup>B</sup>	4.78	0.218 <sup>B</sup>	5.54	...	...	...	...
22	22.000	558.80	0.188 <sup>B</sup>	4.78	0.218 <sup>B</sup>	5.54	...	...	...	...
24	24.000	609.60	0.218 <sup>B</sup>	5.54	0.250	6.35	...	...	...	...
30	30.000	762.00	0.250	6.35	0.312	7.92	...	...	...	...

<sup>A</sup> Schedules 5S and 10S wall thicknesses do not permit threading in accordance with the American National Standard for Pipe Threads (ANSI B1.20.1).

<sup>B</sup> These do not conform to the American National Standard for Welded and Seamless Wrought Steel Pipe (ANSI B36.10-1979).

**ANEXO II.**  
**HOJA TÉCNICA DE LA VARILLA DE APORTE 2209 ASME/ AWS**  
**A5.4 E 2209-16**

El siguiente anexo presenta las características, composición química y propiedades mecánicas del material de aporte utilizado en la soldadura.

	<b>NICROSOL 2209</b> <b>ASME/ AWS A5.4 E 2209-16</b>		Versión : 00 Página : 1 de 1 Fecha : 01/03/2011
	C.C (+)		
<b>HOJAS TÉCNICAS SOLDADURAS</b>			

### CARACTERÍSTICAS

**NICROSOL 2209** es un electrodo cuyo metal depositado tiene una composición química nominal de Cr: 22,5% - Ni: 9,5% - Mo: 3% - N: 0,15%, que permite obtener una microestructura "duplex" cuya matriz es austenítica-ferrítica.

**NICROSOL 2209** se recomienda para soldar todos los aceros duplex que contengan aproximadamente 22% de Cromo.

El metal depositado por **NICROSOL 2209** combina un incremento de su resistencia mecánica con una excelente resistencia a corrosión por "pitting" y a corrosión bajo tensión por la presencia de derivados de Cloro, hasta 300° C.

### APLICACIONES

**NICROSOL 2209** es un electrodo indicado para unir o revestir aceros inoxidables duplex, con estructura austenítica-ferrítica como los aceros AISI 2205 (WNo.1.4462, UNS 31803, UNS 32205), AISI 2209 (UNS W39209), AISI 2553 (UNS W39553), WNo. 1.4417, UNS31500, etc.

**NICROSOL 2209** es un electrodo extremadamente versátil por su excelente soldabilidad en todas las posiciones, se puede soldar con bajos amperajes y no se coloca rojo, aprovechando completamente el electrodo. El metal depositado acepta pulido espejo.

*Como aporte TIG, se provee como APT-2209, AWS A5.9 ER2209*

### COMPOSICION QUIMICA

C < 0,04%; Cr: 21,5%-23,5%; Ni: 8,5-10,5%; Mo: 2,5-3,5% ; Mn: 0,5-2,0%; N: 0,08-0,20%; Cu < 0,75

### PROPIEDADES MECANICAS TIPICAS

- Resistencia a Tracción : > 690 N/mm<sup>2</sup>
- Alargamiento en 2" : > 20%

### AMPERAJES RECOMENDADOS

DIAMETRO	AMPERAJE
5/64" (2,0mm)	25 A - 40 A
3/32" (2,5mm)	40 A - 75 A
1/8" (3,2mm)	70 A - 110 A
5/32" (4,0mm)	110 A - 140 A
3/16" (5,0mm)	130 A - 180 A

Elaborado por: Dpto. Técnico	Aprobado por: Gerente Técnico
------------------------------	-------------------------------

**ANEXO III.**  
**GUÍA ESTÁNDAR PARA EXÁMEN Y EVALUACIÓN DE LA**  
**CORROSIÓN POR PICADURAS ASTM-G46**

El siguiente anexo cita de la norma ASTM-G46 la clasificación de los tipos de corrosión por picaduras.

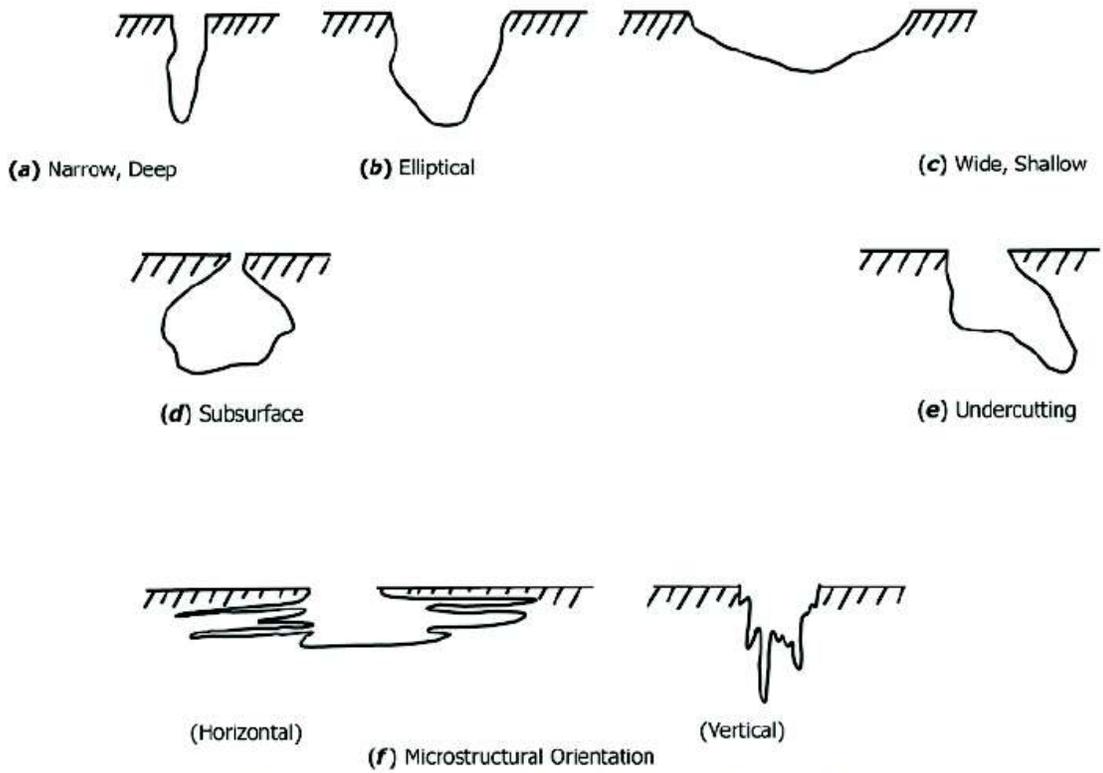


FIG. 1 Variations in the Cross-Sectional Shape of Pits

## **ANEXO IV.**

### **WPS DE SOLDADURA**

El siguiente anexo presenta el procedimiento de soldadura, tomando como fuente el trabajo de caracterización de la soldadura GTAW realizada a una tubería de acero inoxidable dúplex 2205 (Jaramillo & Martínez, 2017)

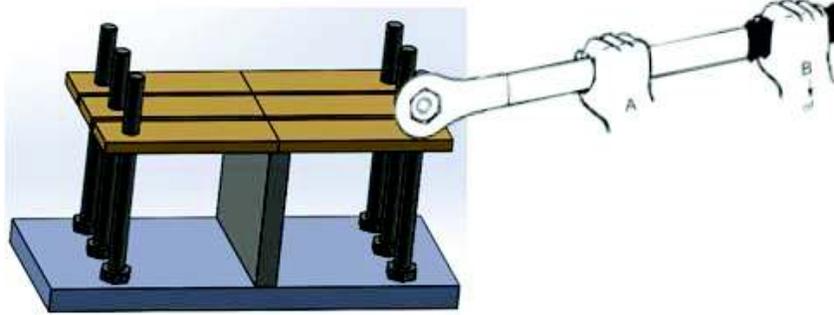
		<b>ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA</b> <b>LABORATORIO DE SOLDADURA</b> <b>WPS</b>						
Proceso de Soldadura <u>GTAW</u> Soldador <u>JORGE GUZMÁN SW-31</u>			Tipo Manual <u>X</u> Semi-Automática _____ Máquina _____ Automática _____ Fecha <u>20/9/2017</u>					
<b>DISEÑO DE LA UNIÓN</b> Tipo: <u>Ranura en V Biselado</u> Sencilla <u>X</u> Doble _____ Resplado Sí _____ No <u>X</u> Material de respaldo <u>NA</u> Separación de la raíz <u>4 mm (5/32")</u> Ángulo de la unión <u>60°</u> Saneamiento de la Raíz Sí _____ No <u>X</u>			<b>POSICIÓN</b> Posición de Ranura <u>6G</u> Filete _____ Progresión: Ascendente: <u>X</u> Descendente: _____					
<b>MATERIAL BASE</b> Especificación <u>ASTMA276</u> Tipo o Grado <u>DIN Dúplex 2205</u> Espesor: Ranura <u>6,2 mm</u> Filete <u>NA</u> Diámetro (Tubo) <u>101,6 mm (4")</u>			<b>CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS</b> Modo de transferencia (GMAW) <u>NA</u> Corto circuito <u>_____</u> Globular <u>_____</u> Spray <u>_____</u> Corriente: CA <u>_____</u> CDEP <u>_____</u> DC- <u>X</u> Pulsada <u>_____</u> Otro <u>_____</u> Electrodo de Tungsteno (GTAW) <u>EWTh 2</u>					
<b>MATERIALES DE APORTE</b> Clasificación AWS <u>AWS 5.9</u>			<b>TÉCNICA</b> Aportación Recta u Oscilante <u>OSCILANTE</u> Paso sencillo o múltiple <u>MÚLTIPLE</u> Electrodo <u>ÚNICO</u> Espaciamiento entre electrodos: <u>NA</u> Longitudinal _____ Lateral _____ Ángulo _____ Distancia tubo de contacto-pieza <u>NA</u> Martilleo <u>NA</u> Limpieza entre pases <u>GRATA</u>					
<b>PROTECCIÓN DEL ARCO</b> Fundente <u>N/A</u> Gas <u>ARGÓN</u> Electrodo <u>EWTh2</u> Flujo <u>20-25 l.min</u> Tipo <u>Agregado 2% de Torio</u> T. de la Copa _____			<b>TRATAMIENTO TÉRMICO</b> Temperatura <u>NA</u> Tiempo <u>NA</u>					
<b>PRECALETAMIENTO</b> Temp. De Precaletamiento: <u>NA</u> Temp. Ente pasos: <u>Mín</u> <u>Máx</u>								
<b>PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA</b>								
PASOS	PROCESO	MATERIAL APORTE		CORRIENTE		VOLTS	VELOCIDAD	DETALLE DE LA UNIÓN
		CLASE	DIÁMETRO	TIPO/POLARID	AMPS		DE AVANCE	
1	GTAW	ER 2209	2,4 mm	DC-	76 A	8 V	3 cm/min	
2	GTAW	ER 2209	2,4 mm	DC-	95 A	9 V	4 cm/min	
3	GTAW	ER 2209	2,4 mm	DC-	95 A	10 V	5 cm/min	
4	GTAW	ER 2209	2,4 mm	DC-	95 A	8 V	4 cm/min	
PROMEDIO	GTAW	ER 2209	2,4 mm	DC-	90,25 A	8,75 V	4 cm/min	

## **ANEXO V.**

### **CÁLCULO DEL TORQUE**

El siguiente anexo presenta el cálculo del torque máximo a aplicar sobre las probetas en el proceso de corrosión.

## Torque



Dada la siguiente fórmula se calcula la fuerza (Gunn, 1997):

$$P = \frac{6yED}{L^2}$$

Dónde:

$P$  = Fuerza aplicada (N)

$y$  = Deformación (m)

$E$  = Módulo de elasticidad (Pa)

$D$  = Ancho(m)

Se asume o requiere una deformación de  $1 \text{ cm} = 0,01\text{m}$  para que la probeta no sobrepase su límite elástico y tienda a deformarse.

**Datos:**

$y = 0,01$  (m)

$E = 190 \times 10^9$  (Pa)

$D = 0,0062$  (m)

$$P = \frac{6(0,01) * (190 \times 10^9) * (0,0062)}{(0,141)^2}$$

$$P = 3,55 \times 10^9 \text{ Pa} = 3,55 \text{ GPa}$$

Con las medidas del perno inoxidable A2-70 de diámetro  $0,79 \text{ cm} = 0,0079 \text{ mm}$  se determina el área de la fuerza.

$$A = \pi r^2$$

$$A = \pi \left( \frac{0,0079}{2} \right)^2$$

$$A = 4,90 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

A continuación, se aplica la fórmula de presión

$$P = \frac{F}{A}$$

Se necesita calcular la fuerza aplica, se despeja de la fórmula anterior

$$F = P \cdot A$$

$$F = 3,55 \times 10^9 * (4,9 \times 10^{-5} )$$

$$F = 173,95 \text{ kN}$$

Para calcular el torque aplicado se tiene los siguientes datos:

- Diámetro mayor  $d = 0,375 \text{ in}$
- Diámetro medio  $dm = 0,333 \text{ in}$
- Diámetro menor  $dr = 0,292 \text{ in}$
- Paso  $p = 0,083 \text{ in}$

De tablas se encuentra las constantes de un perno de torsión y se obtiene el torque a aplicar.

-  $At = 0,077 \text{ in}^2$  hilos por pulgada = 16

-  $\mu = 0,015$   $\alpha_F = 14,5^\circ$   $k_i = 0,21$  pernos no lubricados

$$T_b = F \frac{dm \mu \pi dm - l}{2 \pi dm + \mu l}$$

Siendo:

$$l = \tan \gamma (\pi dm)$$

$$l = \tan 14,5^\circ * \pi(0,008)$$

$$l = 0,006$$

$$dm = 0,008$$

$$T_b = 174.3 * \frac{0,008}{2} * \frac{0,015\pi(0,008) - 0,006}{\pi 0,008 + 0,015 * 0,006}$$

$$T_b = 7,64 \text{ N. m}$$

Entonces se escoge un torque máximo de:  $T_b = 7,64 \text{ N. m}$  y torques menores a este valor.

**ANEXO VI.**  
**RESULTADO DEL ENSAYO DE TRACCIÓN**

El siguiente anexo presenta los resultados obtenidos del ensayo de tracción realizado en el Laboratorio de Análisis Esfuerzos y Vibraciones de la universidad.



## INFORME TÉCNICO

LAEV – ENE.18.33.0

Quito, 26 de enero de 2018

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

Los resultados contenidos en el presente informe corresponden a ensayos realizados en muestras de acero dúplex pertenecientes al Sr. XAVIER PILA y la Srta. GABRIELA BASTIDAS para el proyecto de titulación "ESTUDIO Y ANÁLISIS DE LA MICROESTRUCTURA DEL PROCESO ACELERADO DE CORROSIÓN EN EL ACERO DUPLEX 2205 SOLDADA MEDIANTE PROCESO GTAW". Las muestras fueron entregadas en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Escuela Politécnica Nacional.

### RESULTADOS

- MUESTRA:** Tres (3) probetas de acero dúplex 2205 para ensayo de tracción.
- ENSAYO DE TRACCION**

En la tabla 1 se presentan los resultados del ensayo de tracción realizado a las probetas.

Tabla 1. Resultados del ensayo de tracción

Id.	Ancho promedio	Espesor promedio	Carga máxima registrada		Límite de fluencia		Resistencia a la tracción		% Elongación en 50 mm
	mm	mm	lbf	N	ksi	MPa	ksi	MPa	
ET1	12,38	5,85	12.820	57.026	96,0	661,9	114,2	787,4	37,0
ET2	12,49	5,78	12.560	55.870	94,0	648,1	112,2	773,9	36,5
ET3	12,62	5,82	12.800	56.937	95,0	655,0	112,4	775,2	37,0

	REVISADO POR:	APROBADO POR:
<b>Firma:</b>		
<b>Nombre:</b>	Ing. Jonathan Castro, M.Sc.	Ing. Mario Granja, M.Sc.
<b>Cargo:</b>	TÉCNICO DOCENTE	JEFE
<b>LABORATORIO DE ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES</b>		
ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL		

## **ANEXO VII.**

### **RESULTADOS DEL PROCESO DE CORROSIÓN**

El siguiente anexo presenta los resultados obtenidos del ensayo de corrosión acelerada de las probetas P1, P2, P4, P22 y P33, realizado en el Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla.

PROCESO DE CORROSIÓN						
	MB					
	ZAC					
	MA					
	ZAC					
	MB					
		Aumento: 4X	Aumento: 4X	Aumento: 28X		
Probeta:	<b>P1</b>	Torque:	8,13 [Nm]	Tiempo de exposición:	90 días	
	MB					
	ZAC					
	MA					
	ZAC					
	MB					
		Aumento: 4X	Aumento: 4X	Aumento: 28X		
Probeta:	<b>P2</b>	Torque:	2,71 [Nm]	Tiempo de exposición:	90 días	
	MB					
	ZAC					
	MA					
	ZAC					
	MB					
		Aumento: 4X	Aumento: 4X	Aumento: 28X		
Probeta:	<b>P4</b>	Torque:	5,42 [Nm]	Tiempo de exposición:	90 días	
	MB					
	ZAC					
	MA					
	ZAC					
	MB					
		Aumento: 4X	Aumento: 4X	Aumento: 28X		
Probeta:	<b>P22</b>	Torque:	5,42 [Nm]	Tiempo de exposición:	90 días	
	MB					
	ZAC					
	MA					
	ZAC					
	MB					
		Aumento: 4X	Aumento: 4X	Aumento: 28X		
Probeta:	<b>P33</b>	Torque:	2,71 [Nm]	Tiempo de exposición:	90 días	

## **ANEXO VIII.**

### **RESULTADOS DEL ENSAYO DE MICRODUREZAS VICKERS**

El siguiente anexo presenta los resultados obtenido del ensayo de microdurezas realizado en el Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla.

# Micro Hardness Analysis Report

Tema	Tesis Acero Duplex 2205	Fecha	20/2/2018
Materia	Acero Inoxidable Duplex 2205	Carga	300
Reportado por	LMDF	No.	P3

ZONA	Label	HRC	HV	D1	D2	MEAN DIAGONAL	DEPTH	PROBETA
P3_21	O1	27,00	273,29	45,94	44,28	45,11	0	
	O2	27,00	278,00	44,77	44,69	44,73	0	
	O3	27,00	273,23	45,25	44,99	45,12	0	
	O4	26,00	271,22	44,90	45,67	45,29	0	
	MEAN	26,75	273,94	45,22	44,91	45,06	0	
P3_22	O1	--	205,18	52,94	51,19	52,06	0	
	O2	--	227,84	50,49	48,33	49,41	0	
	O3	--	239,89	48,88	47,42	48,15	0	
	O4	--	237,14	48,60	48,26	48,43	0	
	MEAN	--	227,51	50,23	48,80	49,51	0	
P3_23	O1	29,00	290,22	44,48	43,08	43,78	0	
	O2	27,00	273,38	45,17	45,04	45,11	0	
	O3	27,00	272,53	45,60	44,76	45,18	0	
	O4	27,00	275,44	45,81	44,06	44,94	0	
	MEAN	27,50	277,89	45,27	44,24	44,75	0	
P3_24	O1	26,00	268,37	45,24	45,80	45,52	0	
	O2	24,00	258,35	46,36	46,43	46,40	0	
	O3	24,00	255,61	46,37	46,93	46,65	0	
	O4	23,00	252,22	46,57	47,34	46,96	0	
	MEAN	24,40	260,08	46,10	46,41	46,25	0	

Tema	Tesis Acero Duplex 2205	Fecha	20/2/2018
Materia	Acero Inoxidable Duplex 2205	Carga	300
Reportado por	LMDF	No.	P5

ZONA	Label	HRC	HV	D1	D2	MEAN DIAGONAL	DEPTH	PROBETA
P5_21	O1	--	155,04	70,98	48,81	59,00	0	
	O2	30,00	301,17	42,73	43,22	42,97	0	
	O3	27,00	274,24	44,27	45,80	45,04	0	
	O4	26,00	268,34	46,72	44,34	45,53	0	
	MEAN	20,75	249,70	51,18	45,54	48,96	0	
P5_22	O1	--	196,90	66,71	39,58	53,15	0	
	O2	24,00	255,63	47,62	45,67	46,65	0	
	O3	25,00	265,91	45,39	46,08	45,73	0	
	O4	21,00	242,02	48,25	47,63	47,94	0	
	MEAN	17,50	240,12	51,99	44,74	48,37	0	
P5_23	O1	26,00	271,40	44,97	45,57	45,27	0	
	O2	28,00	282,46	43,64	45,11	44,38	0	
	O3	28,00	280,29	45,31	43,78	44,55	0	
	O4	26,00	271,55	45,53	44,99	45,26	0	
	MEAN	27,00	276,42	44,86	44,86	44,86	0	
P5_24	O1	22,00	246,59	47,28	47,70	47,49	0	
	O2	22,00	246,57	47,55	47,44	47,50	0	
	O3	22,00	243,03	49,03	46,65	47,84	0	
	O4	23,00	251,85	48,32	45,67	46,99	0	
	MEAN	22,20	246,71	48,14	46,82	47,48	0	

Tema	Tesis Acero Duplex 2205	Fecha	20/2/2018
Materia	Acero Inoxidable Duplex 2205	Carga	300
Reportado por	LMDF	No.	P11

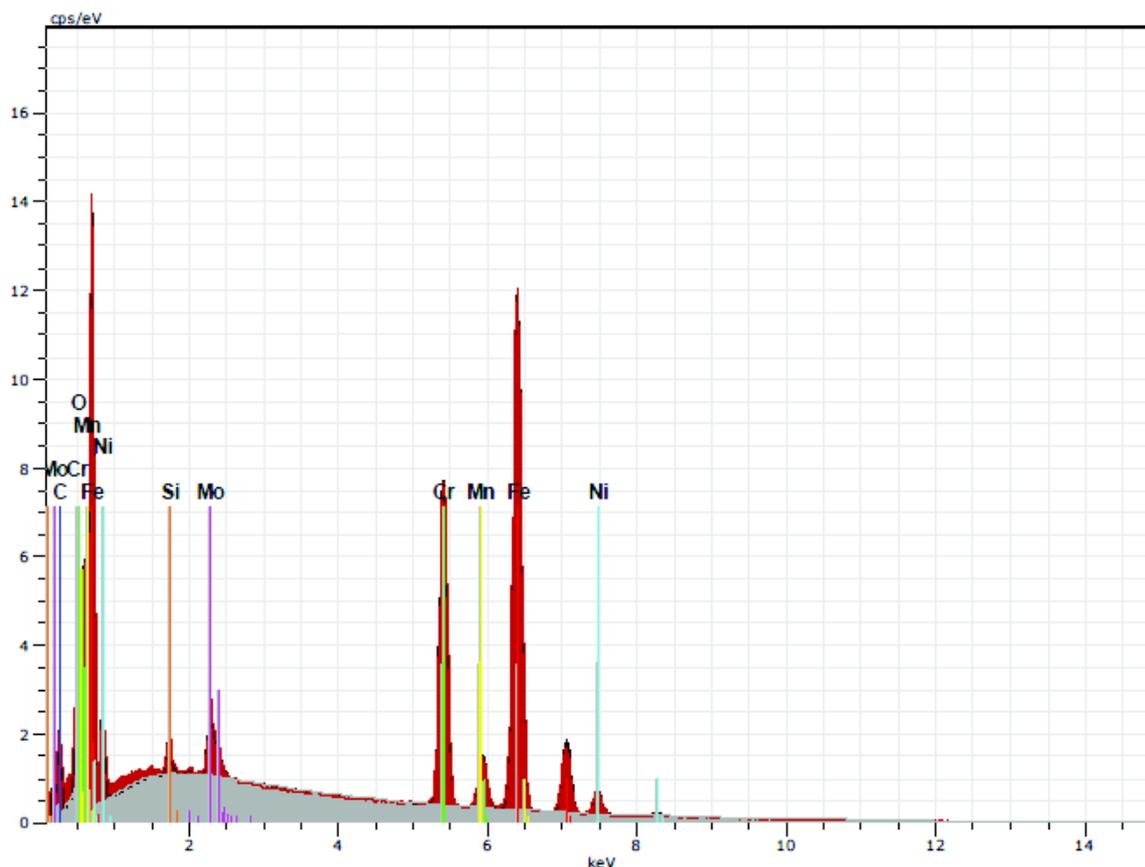
ZONA	Label	HRC	HV	D1	D2	MEAN DIAGONAL	DEPTH	PROBETA
P11_21	O1	--	207,09	56,44	51,82	51,82	0	
	O2	25,00	265,91	45,81	45,74	45,74	0	
	O3	26,00	268,70	45,53	45,5	45,50	0	
	O4	24,00	257,96	45,53	46,43	46,43	0	
	MEAN	18,75	249,92	48,31	47,37	47,37	0	
P11_22	O1	23,00	248,89	47,97	46,57	47,27	0	
	O2	--	225,89	49,09	50,15	49,62	0	
	O3	21,00	242,02	48,18	47,69	47,94	0	
	O4	--	238,49	48,75	47,84	48,29	0	
	MEAN	11,00	238,82	48,50	48,06	48,28	0	
P11_23	O1	29,00	292,54	43,78	43,43	43,60	0	
	O2	28,00	284,24	44,41	44,41	44,24	0	
	O3	23,00	249,52	47,42	47,01	47,21	0	
	O4	24,00	256,64	48,13	44,98	46,55	0	
	MEAN	26,00	270,74	45,94	44,87	45,40	0	
P11_24	O1	25,00	265,1	46,08	45,53	45,80	0	
	O2	24,00	257,55	46,30	46,65	46,47	0	
	O3	25,00	261,09	46,09	46,22	46,16	0	
	O4	25,00	265,09	45,88	45,73	45,81	0	
	O5	24,00	257,51	47,20	45,74	46,47	0	
	MEAN	24,60	261,27	46,31	45,97	46,14	0	

Tema	Tesis Acero Duplex 2205	Fecha	20/2/2018
Materia	Acero Inoxidable Duplex 2205	Carga	300
Reportado por	LMDF	No.	P6

ZONA	Label	HRC	HV	D1	D2	MEAN DIAGONAL	DEPTH	PROBETA
P6_21	O1	25,00	261,05	46,29	46,02	46,16	0	
	O2	24,00	257,10	46,31	46,72	46,51	0	
	O3	22,00	245,03	46,86	48,43	47,64	0	
	O4	25,00	265,47	45,52	46,02	45,77	0	
	MEAN	24,00	257,16	46,50	46,80	46,52	0	
P6_22	O1	23,00	249,64	44,48	49,93	47,20	0	
	O2	22,00	243,71	47,92	47,62	47,77	0	
	O3	26,00	269,19	44,83	46,08	45,46	0	
	O4	24,00	259,50	46,30	46,30	46,30	0	
	MEAN	23,75	255,51	45,88	47,48	46,68	0	
P6_23	O1	--	189,79	55,95	58,52	57,23	0	
	O2	--	220,47	51,69	48,77	50,23	0	
	O3	26,00	271,27	46,35	44,21	45,28	0	
	O4	21,00	242,62	47,42	48,33	47,88	0	
	MEAN	11,75	226,04	50,35	49,96	50,16	0	
P6_24	O1	24,00	254,80	45,53	47,92	46,72	0	
	O2	24,00	258,74	46,92	45,80	46,36	0	
	O3	23,00	250,72	47,69	46,51	47,10	0	
	O4	23,00	253,97	47,42	46,18	46,80	0	
	O5	21,00	241,32	47,90	48,12	48,01	0	
	MEAN	23,00	251,91	47,09	46,91	47,00	0	

**ANEXO IX.**  
**RESULTADOS DEL ENSAYO DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA**  
**DE BARRIDO EDS**

El siguiente anexo presenta los resultados obtenidos del ensayo de microscopía de barrido electrónica realizado en el DEMEX.



Bremsstrahlung Fecha:3/2/2018 4:54:43 PM HV:15.0kV D. imp.:4.98kcps  
 RM-9252 4 Fecha:3/2/2018 4:54:43 PM HV:15.0kV D. imp.:12.83kcps  
 Suma Fecha:3/2/2018 4:54:43 PM HV:15.0kV D. imp.:10.44kcps

Spectrum: RM-9252 4

Element	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Hierro	K-series	59.37	62.81	49.83	1.76
Cromo	K-series	19.25	20.36	17.35	0.58
Carbono	K-series	6.11	6.47	23.86	0.87
Níquel	K-series	4.56	4.82	3.64	0.18
Molibdeno	L-series	2.97	3.14	1.45	0.13
Manganeso	K-series	0.97	1.03	0.83	0.06
Silicio	K-series	0.61	0.64	1.02	0.05
Oxígeno	K-series	0.69	0.73	2.03	0.14
Total:		94.53	100.00	100.00	



NANTU B- NANTU D 1974  
 Fecha: 3/2/2018 4:59:03 PM  
 Tamaño de imagen: 512 x 512  
 Aum: 430.672374065617x  
 HV: 15.0kV

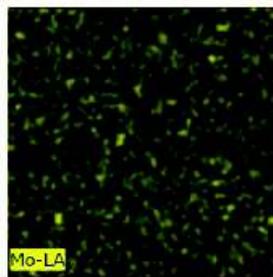
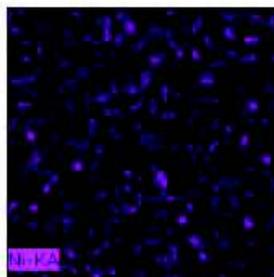
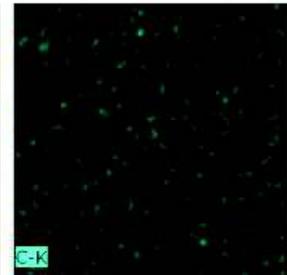
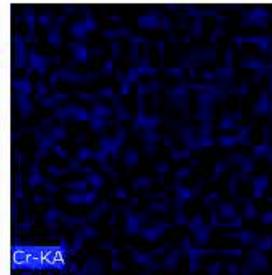
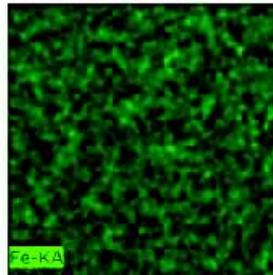


NANTU B- NANTU D 1974  
 Fecha: 3/2/2018 4:59:03 PM  
 Tamaño de imagen: 512 x 512  
 Aum: 430.672374065617x  
 HV: 15.0kV

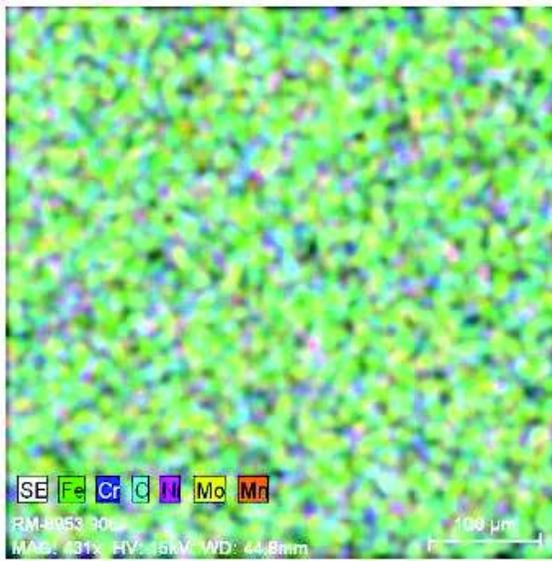


RM-8953 906  
 Fecha: 3/2/2018 5:03:57 PM  
 Tamaño de imagen: 512 x 512  
 Aum: 430.672374065617x  
 HV: 15.0kV

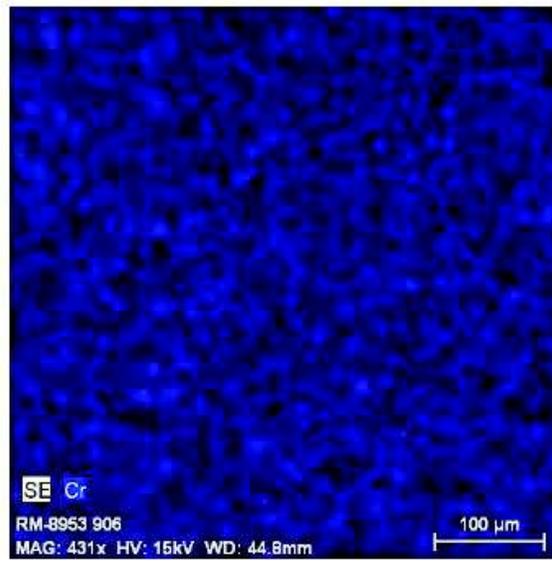
BSE



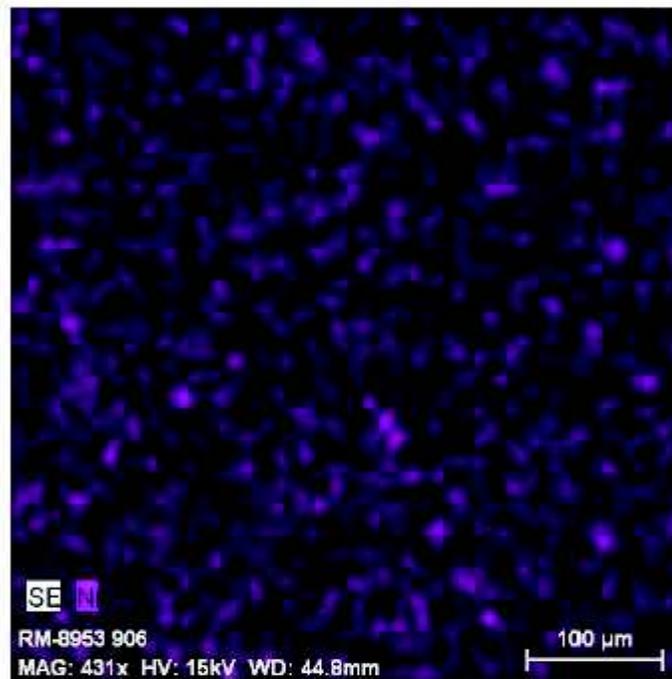
BSE, Fe-KA, Cr-KA, C-K, Ni-KA, Mo-LA, Mn-KA,  
 Fecha: 3/2/2018 5:03:57 PM  
 Tamaño de imagen: 512 x 512  
 Aum: 430.672374065617x  
 HV: 15.0kV



RM-8953 906  
Fecha:3/2/2018 4:59:57 PM  
Tamaño de imagen:512 x 512  
Aum:430.672374065617x  
HV:15.0kV



RM-8953 906  
Fecha:3/2/2018 4:59:57 PM  
Tamaño de imagen:512 x 512  
Aum:430.672374065617x  
HV:15.0kV



RM-8953 906  
Fecha:3/2/2018 4:59:57 PM  
Tamaño de imagen:512 x 512  
Aum:430.672374065617x  
HV:15.0kV

**ANEXO X.**  
**ESPECIFICACIONES DE FABRICANTES DE ACERO INOXIDABLE**  
**DÚPLEX 2205 (UNS S31803)**

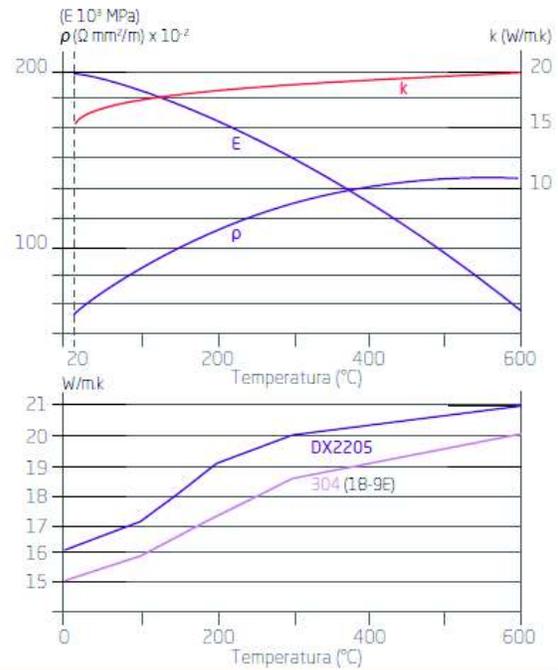
El siguiente anexo presenta las propiedades mecánicas y físicas del acero inoxidable 2205 dadas por fabricantes (APERAM y CHILEXPO).

## Propiedades físicas

Chapa laminada en frío y recocida.

Densidad	d	kg/dm <sup>3</sup>	20 °C	7.8
Temperatura de fusión	-	°C	-	1460
Calor específico	c	J/kgK	20 °C	460
Conductividad térmica	k	W/mK	20 °C	16
Coefficiente medio de dilatación térmica*	$\alpha$	10 <sup>-6</sup> /K	20-100 °C 20-200 °C	13.0 13.5
Resistividad eléctrica	$\rho$	$\Omega$ mm <sup>2</sup> /m	20 °C	0.8
Permeabilidad magnética	-	-	-	yes
Modulo de Young	E	10 <sup>3</sup> MPa	20 °C	200

\* Dilatación térmica 25% la de la del 316, comparable con los aceros al carbono.



## Propiedades mecánicas

### Condición de recocido

Según ISO 6892-1, part 1.

Probeta perpendicular a la dirección de laminado.

Probeta:

Largo= 80 mm ( espesor < 3 mm).

Largo= 5,65 √ So ( espesor ≥ 3 mm).

Condición	Rm <sup>(1)</sup> (MPa)	R <sub>0,2</sub> <sup>(2)</sup> (MPa)	A <sup>(3)</sup> (%)	HRB
Laminado en frío*	840	620	29	98

1 MPa= 1 N/mm<sup>2</sup>.

Valores típicos.

<sup>(1)</sup> Resistencia máxima a la tracción (UTS). <sup>(2)</sup> Límite elástico (YS). <sup>(3)</sup> Elongación (A).

### A altas temperaturas

Temperatura	50°C	100°C	150°C	200°C	250°C
R <sub>10,2</sub> (MPa)	≥ 420	≥ 360	≥ 335	≥ 315	≥ 300
R <sub>m</sub> (MPa)	≥ 640	≥ 590	≥ 570	≥ 550	≥ 540

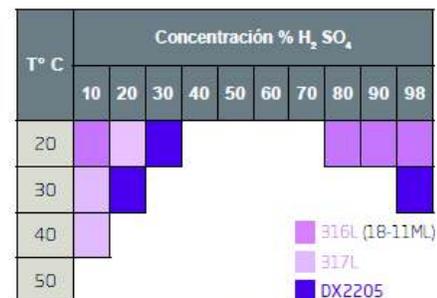
## Resistencia a la corrosión

Se recomienda particularmente esta calidad en caso de corrosión severa y para reemplazar los aceros austeníticos altamente aleados.

### Corrosión generalizada

Concentración en cloruro (g/l)		1			5		
Concentración en fluoruros (ppm)		0	400	1000	0	400	1000
pH	6	316L		DX2205			
	4						
	2	UNS S32550					
	1	Ti/Ni					

Resistencia del DX2205 según nivel de cloruros, fluoruros y pH.



Límite de empleo del DX2205 en ácido sulfúrico (velocidad de corrosión máxi= 0,2 mm/año)

# Aleación 2205

# Duplex

## INFORMACIÓN GENERAL

La aleación 2205 es un acero inoxidable dúplex con altas propiedades en cuanto a la resistencia a la corrosión, además de una excelente dureza frente a impactos.

La aleación 2205 ofrece una resistencia a las picaduras y hendiduras mayor que las aleaciones 316L o 317L contra casi toda materia corrosiva. También, cuenta con propiedades superiores contra la corrosión y fatiga de erosión, además de una expansión térmica más baja y conductividad térmica más alta que los aceros austeníticos.

El límite elástico es casi el doble de los aceros inoxidables austeníticos, lo cual permite a un diseñador ahorrar peso y hace que el costo de esta aleación sea más competitivo en comparación con la 316L o la 317L.

La aleación 2205 es especialmente adecuado para aplicaciones que caen en el rango de temperatura entre -50°F a +600°F (-45.6°C a 315.6°C). Su uso en temperaturas fuera de este rango se puede considerar, pero será necesario aplicar algunas restricciones, especialmente para estructuras soldadas.

## ESTÁNDARES

UNS S31803 / W.N. 1.4462 / DIN X2CrNiMoN 22 5 3

## APLICACIONES

- » Recipientes a presión, tanques, tuberías, e intercambiadores de calor en la industria de procesamiento de químicos
- » Tuberías e intercambiadores de calor para el manejo de gas y petróleo
- » Sistemas de depuración
- » Digestores de pulpa y papel, equipos de blanqueamiento, y sistemas para el manejo de inventario
- » Rotores, ventiladores, ejes, y rodillos de presión que requieren fuerza y resistencia contra la corrosión aumentada
- » Tanques de carga para barcos y camiones
- » Equipos para el procesamiento de alimentos
- » Plantas de biocombustibles.

## COMPOSICIÓN QUÍMICA

	Porcentaje por Peso
C	0,02
Cr	22,1
Mo	3,1
N	0,18

## RESISTENCIA A LA CORROSIÓN Y OXIDACIÓN

### Corrosión General

Debido a su alto contenido de cromo (22%), molibdeno (3%), y nitrógeno (0.18%), las propiedades de la 2205 contra la corrosión son superiores en comparación con la 316L o la 317L en la mayoría de entornos.

### Resistencia a la Corrosión Localizada

El cromo, molibdeno, y nitrógeno en la 2205 también proveen una resistencia excelente contra la corrosión de picaduras/hendiduras aun en soluciones ácidas y muy oxidantes.

### Agrietamiento por Corrosión Bajo Presión

La microestructura duplex es conocida por su habilidad de mejorar la resistencia al agrietamiento por corrosión bajo presión en los aceros inoxidables.

El agrietamiento por corrosión bajo presión causado por el cloruro puede ocurrir cuando se encuentran las condiciones necesarias de temperatura, resistencia a la tracción, oxígeno, y cloruros estén presentes. Debido a que estas condiciones no se controlan fácilmente, el agrietamiento por corrosión bajo estrés ha sido a menudo un obstáculo en el uso de 304L, 316L, y 317L.

### Resistencia a la Corrosión por Fatiga

La aleación 2205 combina mayor fuerza con una resistencia a la corrosión muy alta. Las propiedades de la 2205 beneficiarán aplicaciones donde equipos son sujetos a un entorno altamente corrosivo y a cargas dinámicas cíclicas.

## PROPIEDADES FÍSICAS

Módulo de Elasticidad en Tensión	26x 10 <sup>6</sup> psi
Densidad	0,287 lb/in <sup>3</sup>

## PROPIEDADES MECÁNICAS

0.2% Desplazamiento	74
Límite Elástico, ksi	105
Resistencia a la Tracción, ksi	30
Elongación, %	256
Dureza, HB	

www.chilexpo.com  
ventas@chilexpo.com

Av. Apoquindo 5583 oficina 131, Las Condes, Santiago, Chile  
Tel: +56 (2) 229 9000 Fax: +56 (2) 873 3800

**CHILEXPO**<sup>®</sup>

**ANEXO XI.**  
**COSTOS SINGNIFICATIVOS DELK PROCESO DE**  
**INVESTIGACIÓN**

El siguiente anexo presenta las facturas de los elementos representativos para el desarrollo del presente trabajo de titulación.



RUC 0992146303001

**FACTURA**

Nro 002-003-000007622

Numero de Autorización

0308201701200200300000762209921463030

Fecha y Hora de Autorización 2017-08-03T09:09:07-05:00

Ambiente PRODUCCIÓN

Emision NORMAL

CLAVE DE ACCESO



0308201701099214630300120020030000076220000000016

INGENIERIA EN ABRASIVOS Y SERVICIOS INABRAS S A

INABRAS  
Dirección Panamericana Norte Km 6.5 Parkenor  
Matriz  
Contribuyente Especial Nro. 09008  
Obligado a llevar Contabilidad SI

Reazon Social / Nombres y Apellidos PILA CHASI LUIS ENRIQUE  
Identificación 0501289383001 Fecha Emisión 03/08/2017

Código Principal	Descripción	Cantidad	Precio Unitario	Descuento	Precio Total
43610	ER2209 3/32 OXFORD (10 LBS)	10,00	12,87	0,00	128,70

Email pilaluis6@gmail.com,lmiranda@inabras.com,facturacion@inabras.com  
DirCliente: PRINCIPAL S/N LATACUNSA, COTOPAXI

SubTotal 12%	128,70
SubTotal 0%	0,00
Subtotal Sin Impuesto	128,70
Total Descuento	0,00
ICE	0,00
IVA 12%	15,44
<b>VALOR TOTAL</b>	<b>144,14</b>

**FORMAS DE PAGO**

Código	Descripción	Total Plazo	Un.Tiempo
20	OTROS CON UTILIZACION DEL SISTEMA F	144,14 0	días



# Cesar Vasconez Importaciones Cia. Ltda.

## FACTURA

R.U.C. 1792010071001

Importaciones y Representaciones  
Reactivos Químicos Artículos para  
Laboratorio Aparatos Científicos  
Documento Categorizado: NO

001-001 N° 000011800

Autorización SRI 1120785545

Jipijapa Isla Fernandina 511  
y Av. Tomás de Berlanga  
Teléfono: 2452 578  
Quito - Ecuador

OBLIGADO A LLEVAR CONTABILIDAD

FECHA: 16/10/2017

TELÉFONO: 0995932472

RUC.: 0503727539

CLIENTE: PILA MUSO WILSON JAVIER

DIRECCIÓN: BARRIO OBRERO INDEPENDIENTE 2DA ETAPA

ITEM	CANT	DESCRIPCION	V. UNIT	V. TOTAL
1	10	CLORURO DE SODIO 500 GRS LOBACHEMI	10.00	100.00
OBSERVACIONES FACTURADO POR: MONSERRATTE ARGUELLO			SUBT IVA 12%	100.00
			IVA 0%	0.00
			IVA 12%	12.00
			TOTAL	112.00

**CESAR VASCONEZ**  
IMPORTACIONES CIA. LTDA.  
R.U.C. 1792010071001

Aprobado por

Recibido por

FORMA DE PAGO: Efectivo  Tarjeta Crédito/Débito  Dinero Electrónico  Otros

HERRERA PAREDES ANGEL ASDRUBAL - IMPRESIONES HERRERA - Telf.: 2731331 - R.U.C. 0700861578001 - AUT. - SRI 9616 - Fecha de Impresión: 23/Mayo/2017  
Del 0011301 al 0011800 / Válido para su emisión: 23/Mayo/2018 ORIGINAL: Cliente / COPIA CELESTE: Emisor / COPIA AMARILLA: Sin Valor Tributario

**CERTIFICATE OF ANALYSIS**

Product Name : - SODIUM CHLORIDE AR/ACS  
(Confirming to IP, BP)

Analyzed on: - 03/05/16

Mol. Formula : - NaCl  
Mol. Weight : - 58.44  
Code no. : - 05820  
CAS no. : - 7647-14-5  
Lot no. : - B189021605  
Mfg date : - MAY-2016  
Exp date : - APR-2021

Sr. no.	Tests	Specifications	Results
1	Description	White crystalline powder	White crystalline powder
2	Assay (after ignition)	99.5 - 100.5%	99.78%
3	Identity	Passes test	Passes test
4	Appearance of solution	Passes test	Passes test
5	Insoluble matter	Max. 0.005%	<0.005%
6	Acidity or Alkalinity	Passes test	Passes test
7	pH of 5% solution	5.0 - 8.0	5.64
8	Bromide	Max. 0.005%	0.004%
9	Iodide	Max. 0.001%	0.001%
10	Ferrocyanide (Fe(CN) <sub>6</sub> )	Max. 0.0001%	0.0001%
11	Chlorate & Nitrate (NO <sub>3</sub> )	Max. 0.003%	0.003%
12	Nitrite (NO <sub>2</sub> )	Passes test	Passes test
13	Phosphate (PO <sub>4</sub> )	Max. 0.0005%	0.00049%
14	Sulphate (SO <sub>4</sub> )	Max. 0.001%	0.001%
15	Total nitrogen	Max. 0.0005%	<0.0005%
16	Heavy metals (as Pb)	Max. 0.0005%	0.000499%
17	Arsenic (As)	Max. 0.00004%	<0.00004%
18	Barium (Ba)	Max. 0.001%	0.0010%
19	Calcium (Ca)	Max. 0.002%	0.000103%
20	Copper (Cu)	Max. 0.0002%	0.000168%
21	Iron (Fe)	Max. 0.0002%	0.00163%
22	Magnesium (Mg)	Max. 0.001%	0.000169%

*This document has been produced electronically and it is valid without signature.*

**Loba Chemie Pvt. Ltd.**

Works : Plot No. D-22, MIDC, Tarapur Industrial Area, Boisar, Taluka - Palghar, District - Palghar, Pin - 401508 Tel: 91 02525- 300000/300030  
Regd office : 107 Wode House Road, Jehanghir Villa, Colaba, Mumbai - 400005 Tel: 91 22 6663 6663, Fax: 91 22 22151099

[info@lobachemie.com](mailto:info@lobachemie.com), [www.lobachemie.com](http://www.lobachemie.com)

## ORDEN DE EMPASTADO