



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE LA SENSIBILIDAD A LA CORROSIÓN POR PICADURA DEL ACERO A-572 SOLDADO Y TRATADO TÉRMICAMENTE

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

BARRAGÁN MACHADO LIZETH CAROLINA

lizeth.barragan@epn.edu.ec

LLIVE CAIZA JONATHAN DAVID

jonathan.llive@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. DÍAZ CAMPOVERDE CARLOS WIME, M.Sc.

carlos.diaz@epn.edu.ec

Quito diciembre, 2019

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **BARRAGÁN MACHADO LIZETH CAROLINA** y **LLIVE CAIZA JONATHAN DAVID**, bajo mi supervisión.

Ing. Carlos Díaz, M.Sc.

DIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Nosotros, **Barragán Machado Lizeth Carolina** y **Llive Caiza Jonathan David**, 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 he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis 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.

Barragán Machado Lizeth Carolina

Llive Caiza Jonathan David

DEDICATORIA

Este logro se lo dedico a Dios, quien guía y bendice mi vida, por permitirme el haber llegado hasta éste momento tan importante de mi formación profesional.

A mis padres Fabián y Esperanza quienes con su amor, paciencia, sacrificio y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir un sueño más,

A mis hermanos Juan Carlos, Alejandra y Gabriela por su cariño, apoyo incondicional y por ser ejemplo a lo largo de mi vida.

A mis sobrinas, mis reinas, Valentina y Fabianna, quienes son mi inspiración.

A mis amigos por brindarme su ayuda, pero sobre todo su apoyo constante durante ésta etapa.

Lizeth Barragán.

DEDICATORIA

A Dios y la virgen.

A mis padres Humberto y María, apoyo incondicional en todo momento de mi vida.

A mis hermanos, Mary, Pavel y Jenny.

A mi pequeña Dulce.

A mis amigos.

Jonathan Llive

AGRADECIMIENTO

Siempre agradeceré a Dios, por su amor infinito, por bendecir cada paso que doy, por fortalecer mi corazón, iluminar mi mente y por poner en mi camino siempre a buenas personas.

A mis padres y familia, pues son mi todo; gracias por ser mi motor, ejemplo e inspiración para lograr éste objetivo, gracias por inculcarme buenos valores que ayudan a trazar mi camino; agradecida con ustedes porque son mi sustento ya que siempre me dieron esperanzas y tuvieron fe en mí, pues no tengo palabras para agradecerles las incontables veces que me brindaron su apoyo en todas las decisiones que he tomado a lo largo de mi vida.

A aquella persona que fue ejemplo de perseverancia y apoyo constante, gracias por no dejarme desistir cuando ya no tenía fuerzas para seguir este proceso, por brindarme tu cariño y consejos.

A mis mejores amigos (mosqueteros): Luchito, mi hermano, gracias por ayudarme de inicio a fin en esta difícil carrera, por tu apoyo, colaboración incondicional y predisposición siempre a ayudar desinteresadamente. A ti Llivesito, por ser un excelente compañero y gran amigo, por la confianza para desarrollar este trabajo, por la paciencia y por tu dedicación. A ustedes mis confidentes, gracias por cada momento vivido.

Gracias por la amistad especialmente a mis mejores amigas de la U, Jazz y Gaby, también a las del colegio por todo el apoyo en mis momentos difíciles, por no dejarme en aquellos momentos difíciles, por siempre sostener mi mano y darme palabras de aliento en todo momento, en fin, por tantas anécdotas compartidas.

Inmensamente agradecida con la Escuela Politécnica Nacional, y todos los docentes de la Facultad de Ingeniería Mecánica pues supieron formarme en diversos campos de esta carrera; en especial a mi director Ing. Carlos Díaz, además, al Ing. Homero Barragán, por todos los conocimientos impartidos y hacer posible la preparación profesional; por su paciencia, orientación y guiarme durante el proceso de esta investigación.

En general, a todos quienes contribuyeron con un granito de arena para culminar con éxito esta meta propuesta.

Lizeth Barragan.

AGRADECIMIENTO

A Dios y a la virgen por regalarme la bendición de vivir cada día.

A mis padres Humberto y María por estar siempre a mi lado, siendo ese apoyo incondicional, por enseñarme a luchar para alcanzar mis sueños y por ser ese ejemplo de perseverancia que me ha permitido seguir adelante cada día.

A mis hermanos Mary, Pavel y Jenny, por apoyarme en todas las decisiones de mi vida, por ser un pilar fundamental que me ha permitido concluir este proyecto, por todas las anécdotas vividas, secretos guardados, acolites que he necesitado y por ser en ciertos momentos mis alcahuetes.

A mis mejores amigos; Liz, por compartir esta etapa de mi vida y por haber confiado en mí al realizar esta tesis, a Luis por ser ese amigo incondicional, a los dos por todo lo vivido que solo los 3 sabremos y por demostrarme que la verdadera amistad si existe en esta etapa llamada universidad.

A Andre que me supo ayudar cuando más lo necesitaba no solo en este proyecto sino en muchas cosas, también por todos los divertidos momentos que hemos compartido juntos. Al Ing. Carlos Díaz, por su excelente guía en este proyecto de titulación, por sus consejos y conocimientos impartidos hacia mí.

A Don Rene quien fue un gran colaborador al momento de realizar este proyecto. A mis demás amigos que con su ayuda han aportado de forma positiva en este proyecto. El esfuerzo es la magia que transforma los éxitos en realidad.

Jonathan Lliveres

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN.....	i
DECLARACIÓN.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
INDICE DE TABLAS.....	viii
INDICE DE FIGURAS.....	ix
RESUMEN.....	x
ABSTRACT.....	xi
INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos.....	2
1. MARCO TEÓRICO.....	3
1.1. Características del acero A572.....	3
1.2. Composición química.....	3
1.2.1. Propiedades del acero estructural.....	5
1.2.1.1. Esfuerzo de fluencia.....	5
1.2.1.2. Resistencia a la tracción.....	5
1.2.1.3. Elongación.....	5
1.3. Aplicaciones.....	5
1.4. Procesos de soldadura.....	6
1.4.1. SMAW (Shield Metal Arc Welding).....	6
1.4.1.1. Material de aporte.....	7
1.4.2. FCAW - Flux Cored Arc Welding.....	7
1.4.2.1. Material de aporte.....	8
1.4.2.2. Gas de protección.....	9
1.5. Tratamientos térmicos post-soldadura (PWHT).....	9
1.5.1. Tratamiento térmico de recocido (TA).....	10
1.5.2. Tratamiento térmico de alivio de tensiones a 275° C (TR).....	10
1.6. Generalidades de la corrosión.....	11
1.6.1. Elementos que intervienen en la corrosión.....	12
1.6.2. Tipos de corrosión.....	13
1.5.2.1. Corrosión generalizada.....	14
1.5.2.2. Corrosión localizada.....	14
1.5.2.3. Corrosión galvánica.....	14
1.5.2.4. Corrosión por fisuras.....	14
1.5.2.5. Corrosión por cavitación.....	14

1.5.2.6.	Corrosión microbiológica	15
1.5.2.7.	Corrosión – tensión.....	15
1.5.2.8.	Corrosión – fatiga	15
1.5.2.9.	Otros tipos de corrosión.....	15
1.7.	Corrosión por picadura (pitting).....	15
1.7.1.	Parámetros que influyen en la corrosión por picaduras.	17
1.7.1.1	Factores estructurales y metalúrgicos.....	17
1.7.1.2	Microorganismos, productos de corrosión y depósitos.....	17
1.7.1.3	Factores ambientales	18
1.8.	Resistencia a la corrosión de los materiales	18
2.	METODOLOGÍA	20
2.1.	Procedimientos previos a la obtención de probetas	20
2.1.1.	Ensayo de tintas penetrantes	21
2.1.1.1.	Realización del ensayo	21
2.1.1.2.	Materiales utilizados	21
2.1.2.	Equipos utilizados durante los procedimientos previos	22
2.2.	Ensayo de corrosión	24
2.2.1.	Probetas para ensayos de corrosión.....	24
2.2.2.	Realización del ensayo de corrosión.....	25
2.2.3.	Velocidad de corrosión	26
2.2.4.	Equipos y materiales para el ensayo de corrosión	28
2.2.5.	Procedimiento para ensayo de corrosión	30
2.3.	Análisis metalográfico	33
2.3.1.	Metalografías.....	33
2.3.1.1.	Probetas para análisis metalográfico	33
2.3.1.2.	Equipo metalográfico	34
2.3.1.3.	Procedimiento para análisis metalográfico.....	36
2.4.	Ensayo de dureza.....	37
2.4.1.	Probetas para el ensayo de dureza	37
2.4.2.	Equipo para ensayo de dureza	37
2.4.2.1.	Procedimiento para ensayo de dureza.....	38
2.5.	Ensayo de microdureza	39
2.5.1.	Probetas para ensayos de microdureza.....	39
2.5.2.	Equipo utilizado para el ensayo de microdureza	39

2.5.3.	Procedimiento de ensayo de microdureza	40
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	41
3.1.	Resultado de ensayo no destructivo	41
3.2.	Ensayo micrográfico	43
3.2.1.	Ensayo micrográfico inicial	43
3.2.1.1.	Resultado del ensayo macrográfico de la probeta (ST)	46
3.2.1.2.	Resultado del ensayo macrográfico de la probeta (TA)	47
3.2.1.3.	Resultado del ensayo macrográfico de la probeta (TR).	47
3.3.	Resultados del ensayo de corrosión	48
3.3.1.	Pérdida de masa	48
3.3.2.	Velocidad de corrosión	50
3.3.3.	Macrografías.....	50
3.3.4.	Metalografía.....	60
3.3.5.	Profundidad de corrosión.....	66
3.4.	Dureza	71
3.5.	Microdureza.....	74
3.6.	Análisis de resultados	76
3.6.1.	Ensayo no destructivo mediante líquidos penetrantes	76
3.6.2.	Ensayo metalográfico inicial	76
3.6.3.	Discusión del ensayo de corrosión	77
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	80
4.1	CONCLUSIONES.....	80
4.2	RECOMENDACIONES.....	81
4.3	TRABAJOS FUTUROS.....	81
	Referencias Bibliográficas	82
	Anexos	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Composición química típica del electrodo E-8010.	7
Tabla 1.2: Composición química típica del electrodo E71T-1.	8
Tabla 1.3. Propiedades anticorrosivas del acero al carbono.	18
Tabla 2.1: Materiales utilizados en el ensayo.	21
Tabla 2.2. Equipos utilizados para el proceso de corte de las probetas.	22
Tabla 2.3. Rectificación de superficies.	23
Tabla 2.4. Compuestos químicos para la solución.	25
Tabla 2.5. Valores de K a partir de las unidades a obtener.	27
Tabla 2.6: Características del acrílico blanco.	28
Tabla 2.7. Especificaciones de instrumento de medida de temperatura.	29
Tabla 2.8. Especificaciones técnicas de las balanzas.	30
Tabla 2.9: Procedimiento de evaluación de corrosión cada 3 días.	31
Tabla 2.10: Descripción máquina de desbaste grueso.	34
Tabla 2.11: Descripción máquina de desbaste fino.	34
Tabla 2.12: Descripción Pulidora de paño.	34
Tabla 2.13: Descripción microscopio Olympus para macrografías y micrografías.	35
Tabla 2.14. Especificaciones técnicas del equipo de ensayo de dureza.	37
Tabla 2.15: Especificaciones del Micro durómetro.	40
Tabla 3.1: Resultado de ensayo no destructivo mediante líquidos penetrantes.	41
Tabla 3.2: Micrografías iniciales de la probeta sin tratamiento térmico (ST).	43
Tabla 3.3: Metalografías iniciales a las zonas de la probeta tratamiento recocido (TA)...	44
Tabla 3.4. Micrografía inicial a las zonas de la probeta con tratamiento térmico para aliviar tensiones residuales (TR).	45
Tabla 3.5. Resultados de la variación de masa en las probetas sin tratamiento térmico (ST), expuestas 18 días.	48
Tabla 3.6: Resultados de la variación de masa en las probetas con recocido (TA), expuestas 18 días.	48
Tabla 3.7. Resultados de la variación de masa en las probetas con tratamiento térmico para aliviar tensiones residuales (TR), expuestas 18 días.	49
Tabla 3.8. Velocidad de corrosión para todas las probetas durante 432 [horas].	50
Tabla 3.9. Macrografías de las probetas ST lado A, para 3, 6 ,9 días de inmersión en la solución de cloruro férrico.	51
Tabla 3.10: Macrografías de las probetas ST lado B, para 3, 6 ,9 días de inmersión en la solución de cloruro férrico.	52
Tabla 3.11. Tamaño promedio de las picaduras en la probeta ST en los dos lados.	53
Tabla 3.12: Macrografías de las probetas TA lado A, para 3, 6 ,9 días de inmersión en la solución de cloruro férrico.	54
Tabla 3.13: Macrografías de las probetas TA lado B, para 3, 6 ,9 días de inmersión en la solución de cloruro férrico.	55
Tabla 3.14. Tamaño promedio de las picaduras en la probeta TA, en los dos lados.	56
Tabla 3.15: Macrografías de las probetas TR lado A, para 3, 6 ,9 días de inmersión en la solución de cloruro férrico.	56
Tabla 3.16: Macrografías de las probetas TR lado B, para 3, 6 ,9 días de inmersión en la solución de cloruro férrico.	58

Tabla 3.17. Tamaño promedio de las picaduras en la probeta TR, en los dos lados.	59
Tabla 3.18: Metalografía corte transversal probeta ST lado A.....	60
Tabla 3.19. Metalografía corte transversal probeta ST lado B.....	61
Tabla 3.20: Metalografía corte transversal probeta TA lado A.	62
Tabla 3.21. Metalografía corte transversal probeta TA lado B.....	63
Tabla 3.22. Metalografía corte transversal probeta TR lado A.	64
Tabla 3.23. Metalografía corte transversal probeta TR lado B.	65
Tabla 3.24: Dimensiones promedio de la probeta ST, corte transversal.....	67
Tabla 3.25: Dimensiones promedio de la probeta TA, corte transversal.....	69
Tabla 3.26: Dimensiones promedio de la probeta TR, corte transversal.	70
Tabla 3.27: Comparación de profundidades de corrosión entre todos los grupos.	71
Tabla 3.28: Durezas de la probeta sin tratamiento térmico (ST).	72
Tabla 3.29: Durezas de la probeta con tratamiento recocido (TA).....	72
Tabla 3.30: Durezas de la probeta con tratamiento térmico para aliviar tensiones residuales (TR).	72
Tabla 3.31: Resultados de microdureza en las muestras seleccionadas de cada grupo de tratamientos térmicos.	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Grados del acero ASTM A572.	3
Figura 1.2: Requerimientos de la composición química para el acero A572.....	4
Figura 1.3: Propiedades del acero ASTM A572.....	5
Figura 1.4: Proceso de soldadura por arco eléctrico (SMAW).....	6
Figura 1.5: Partes del material de aporte del proceso SMAW.....	7
Figura 1.6: Proceso de soldadura de arco eléctrico (FCAW).....	8
Figura 1.7: Ciclo térmico utilizado en un tratamiento térmico de recocido.....	10
Figura 1.8: Ciclo térmico utilizado en el tratamiento de alivio de tensiones residuales.	11
Figura 1.9: Tipos de corrosión originados en los metales.	13
Figura 1.10: Representación de picadura en una placa de metal.....	16
Figura 1.11. Corrosión por picadura y ruptura de la capa pasiva.....	16
Figura 1.12. Reacción electroquímica de la corrosión por picadura.....	17
Figura 2.1: Placas soldadas y tratadas térmicamente. 1) Placa con tratamiento recocido. 2) Placa sin tratamiento 3) Placa con tratamiento térmico para aliviar tensiones residuales.	20
Figura 2.2. Probetas totalmente libres de protecciones.....	23
Figura 2.3: Dimensiones de las probetas de corrosión.....	24
Figura 2.4. Disposición del cordón de soldadura.....	25
Figura 2.5. Protección de áreas sin contacto.....	26
Figura 2.6. Diseño y distribución en las cámaras.....	26
Figura 2.7. Pegamento para acrílico.....	28
Figura 2.8. Dimensionamiento de las cámaras.....	29
Figura 2.9. Cortes para obtención de probetas para análisis metalográfico. a) Sección a cortar marcada en la probeta b) división del cordón en lados A y B. c) Corte transversal para Análisis metalográfico.....	33
Figura 2.10: Reactivo químico Nital al 10%.....	35
Figura 2.11: Probetas para metalografías, donde: ST (Sin Tratamiento), TA (Tratamiento Térmico de Recocido), TR (Tratamiento térmico para aliviar tensiones residuales)......	36
Figura 2.12. Esquema de la toma de durezas.....	38
Figura 3.1. Micrografías de la distribución de las zonas: zona afectada por el calor(ZAC), zona de fusión parcial (ZPF) y cordón de soldadura (CS), con un aumento de 50X.	44
Figura 3.2: Micrografía de la distribución de las zonas: zona afectada por el calor(ZAC), zona de fusión parcial (ZPF) y cordón de soldadura (CS), con un aumento de 50X.	45
Figura 3.3: Micrografía de la distribución de las zonas: zona afectada por el calor(ZAC), zona de fusión parcial (ZPF) y cordón de soldadura (CS), con un aumento de 50X.	46
Figura 3.4: Macrografía probeta sin tratamiento térmico (ST) (Magnificación 0,4X).....	46
Figura 3.5. Macrografía probeta con tratamiento térmico recocido (TA) (Magnificación 0,4X).....	47
Figura 3.6: Macrografía probeta con tratamiento térmico para aliviar tensiones residuales (TR) (Magnificación 0,4X).....	47
Figura 3.7: Variación de masa cada grupo de probetas.....	49
Figura 3.8: Comparación entre grupos de muestras para la velocidad de corrosión.....	50
Figura 3.9: Numero de picaduras en función del tiempo.....	59

Figura 3.10. Área total de los dos lados correspondientes a la probeta ST, corte transversal.	66
Figura 3.11: Largo y ancho total dos lados correspondientes a la probeta ST, corte transversal.	67
Figura 3.12: Área de corrosión los dos lados correspondientes a la probeta ST, corte transversal.	67
Figura 3.13: Largo y profundidad de las picaduras más representativas de la probeta ST, corte transversal.	67
Figura 3.14: Área total de los dos lados correspondientes a la probeta TA, corte transversal.	68
Figura 3.15: Largo y ancho total dos lados correspondientes a la probeta TA, corte transversal.	68
Figura 3.16: Área de corrosión los dos lados correspondientes a la probeta TA, corte transversal.	68
Figura 3.17: Largo y profundidad de las picaduras más representativas de la probeta TA, corte transversal.	69
Figura 3.18: Área total de los dos lados correspondientes a la probeta TR, corte transversal.	69
Figura 3.19: Largo y ancho total dos lados correspondientes a la probeta TR, corte transversal.	70
Figura 3.20: Área de corrosión los dos lados correspondientes a la probeta TR, corte transversal.	70
Figura 3.21: Largo y profundidad de las picaduras más representativas de la probeta TR, corte transversal.	70
Figura 3.22: Esquema del ensayo de dureza aplicado en el corte transversal.	71
Figura 3.23. Dureza en la zona superior de las probetas ST, TA, TR.	73
Figura 3.24: Dureza en la zona central de las probetas ST, TA, TR.	73
Figura 3.25: Dureza en la zona inferior de las probetas ST, TA, TR.	74
Figura 3.26: Indentaciones en el borde de microdureza a)Probeta ST b)Probeta TA c)Probeta TR.	74
Figura 3.27: Esquema del ensayo de microdureza aplicado en el corte transversal.	75
Figura 3.28. Variación de masa entre tratamientos térmicos.	78
Figura 3.29: Durezas de todos los grupos, al finalizar el ensayo de corrosión.	79

RESUMEN

En el presente trabajo de titulación se desarrolló un análisis del comportamiento de la corrosión por picadura y de un análisis metalográfico en el acero estructural ASTM A572 soldado y tratado térmicamente. Los parámetros de soldadura se obtuvieron de un WPS ya realizado debido a que este trabajo de titulación es complementario, obteniendo así la soldadura aprobada. Aplicando un ambiente de corrosión acelerada, se obtuvieron 3 placas previamente soldadas y tratadas térmicamente, con un tratamiento térmico para aliviar tensiones residuales, recocido y otra sin tratamiento. Se obtuvieron 8 probetas de cada placa, respectivamente, a cada probeta se la sumergió en cloruro férrico con una concentración de 5% en peso según la norma ASTM G48-11, cada cierto periodo de tiempo se toma datos de peso y macrografías de las mismas, observando como las picaduras se van generando, concluido este periodo se analizó la pérdida de masa para cada muestra lo que facilita obtener la velocidad de corrosión, finalmente se obtienen durezas y metalografías para su respectivo análisis. La profundidad de picadura y área de corrosión son otros aspectos analizados para tener una visión de cómo se fue generando toda la corrosión a lo largo del tiempo de estudio. Estos resultados demuestran que las propiedades del acero estructural se vieron afectadas por la presencia de la corrosión para todas las muestras, permitiendo concluir que las probetas revenidas son las más afectadas y las recocidas se comportan mejor frente a la corrosión.

Palabras clave: Picadura, corrosión, acero A572, ZAC, perlita, ferrita acicular.

ABSTRACT

In the present work was developed an analysis the behavior of the pitting corrosion and of a metallographic analysis in structural steel ASTM A572 welded and heat treated. Welding parameters were obtained from a WPS already carried out because this project is complementary, resulting that the welding was approved. Applying an accelerated corrosion environment, 3 plates were obtained, previously welded and heat treated, with a temper of stress relief, annealing, and another without any heat treatment. We obtained 8 test pieces from each samples respectively, each test pieces was submerged in ferric chloride with a concentration of 5% by weight according to ASTM G48-11, every certain period of time, weight data and macrographs of them are taken, observing how the bites are generated. Once this period was over, the loss of mass for each sample was analyzed, which makes it easier for us to obtain the corrosion rate. Finally, hardnesses and metallographies are obtained for their respective analysis. The pitting depth and corrosion area are other aspects analyzed for to have a vision of how all the corrosion was generated throughout the study time. These results demonstrate that the properties of structural steel were affected by the presence of corrosion for all samples, allowing us to conclude that the tempered specimens are the most affected and the anneals behave better against corrosion.

Keywords: Pitting, corrosion, steel A572, ZAC, cementite, acicular ferrite.

“ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE LA SENSIBILIDAD A LA CORROSIÓN POR PICADURA DEL ACERO A572 SOLDADO Y TRATADO TÉRMICAMENTE”

INTRODUCCIÓN

El acero estructural es un material que se puede encontrar en edificios, maquinarias, puentes y estructuras en general, al ser un elemento aleado posee una alta resistencia por lo cual es muy utilizado en las aplicaciones antes mencionadas. Este acero tiene propiedades como la tenacidad y la ductilidad las cuales permiten resistir cargas muy grandes sin que ésta sufra una rotura, también se puede nombrar el aspecto o apariencia del material.

Este acero al ser soldado muestra esfuerzos residuales que son una de las primordiales causas para que las estructuras fallen, en la industria existen técnicas para contrarrestar este problema siendo el tratamiento térmico uno de los más usados para aliviar estos esfuerzos.

La corrosión es un proceso presente en materiales como el acero que lo afectan en su desempeño y eficacia, este proceso se da por el medio ambiente al que está expuesto el metal. Sin embargo, las propiedades del mismo se ven afectadas por cantidades de calor elevadas, estas condiciones y ambientes de trabajo hacen que se produzca la corrosión.

La corrosión por picadura es un proceso localizado de difícil detección en las etapas iniciales, produce agujeros en el acero, este tiene un gran impacto destructivo ya que puede ocasionar fallos inesperados, la picadura puede tardar un largo tiempo en producirse pero una vez iniciado ésta crece a gran velocidad es por eso que la presente investigación se centra en el estudio de la corrosión por picadura, mencionando las posibles causas, el material al ser soldado tendrá afectaciones en zonas como la ZAC y zonas donde se encuentra el material de aporte haciéndole más propenso a este tipo de afectaciones, por lo expuesto, se obtendrá probetas que serán sumergidas en un ambiente de corrosión acelerada (cloruro férrico con una concentración del 5% en peso) según la norma ASTM G48-11, finalizando se realizará un análisis metalográfico (macrografías, micrografías), y un análisis de dureza a lo largo de la probeta para en conclusión obtener el comportamiento de la corrosión conforme avanzó la investigación.

Objetivo general

Estudiar y caracterizar la sensibilidad a la corrosión por picadura del acero A572 soldado y tratado térmicamente.

Objetivos específicos

- Estudiar la sensibilidad a la corrosión por picadura del acero A572, mediante un método acelerado.
- Someter a las probetas soldadas a un ambiente corrosivo, en solución de cloruro férrico bajo la norma ASTM G48-11 con una concentración de 5% en peso, disolviendo 100g de $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ en 900 ml de agua destilada.
- Realizar ensayos de corrosión y metalografía.
- Comparar los resultados de las probetas que se trataron térmicamente para establecer cuál de ellos reacciona de mejor manera frente a la corrosión.
- Realizar el análisis de información con sus respectivas conclusiones y recomendaciones.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Características del acero A572

El acero ASTM A572 es un acero estructural perteneciente al grupo de alta resistencia y baja aleación, está aleado con Niobio y Vanadio que le dan calidad estructural, una alta resistencia, éste acero cuenta con gran ductilidad, facilidad de rolado y soldado, dureza y resistencia a la fatiga que permite satisfacer las especificaciones y normas internacionales, éste acero es utilizado en aplicaciones que necesiten una resistencia mecánica elevada a diferencia de otras propiedades (Bermúdez, 2005).

Este acero está disponible en varios grados (42, 50, 55, 60, 65) dependiendo del tamaño del perfil y grueso de la placa. El grado 50, con $F_y = 345$ MPa o 50 ksi y $F_u = 450$ MPa o 65 ksi está disponible en todos los tamaños y espesores de placa hasta 100 mm (4 in). Este es el grado de acero estructural más utilizado actualmente en el mercado (AHMSA, 2013).

Sus excelentes propiedades, en comparación a otros aceros, permiten, disminuir pesos y reducir espesores de estructuras apernadas, remachadas o soldadas, lo que resulta en una reducción de costos de producción considerables.

En la figura 1.1 se presenta el grado del acero con su tamaño máximo según la norma ASTM A572/A572M.

Grado	Punto de fluencia, min		Espesor o Tamaño Máximo					
	ksi	[MPa]	Platos y Barras		Brida de forma estructural o grosor de pierna		Laminas apiladas	Zeas y camisetas enrolladas
			pulg.	[mm]	pulg.	[mm]		
42 [290] ^A	42	[290]	6	[150]	todos	todos	todos	todos
50 [345] ^A	50	[345]	4 ^B	[100] ^B	todos	todos	todos	todos
55 [380]	55	[380]	2	[50]	todos	todos	todos	todos
60 [415] ^A	60	[415]	1½ ^C	[32] ^C	2	[50]	todos	todos
65 [450]	65	[450]	1½	[32]	2	[50]	todos	todos

Figura 1.1. Grados del acero ASTM A572.

(Fuente: Norma ASTM A572/ A572M, 2013)

1.2. Composición química

Al adicionar vanadio y niobio como microaleantes en la elaboración de aceros estructurales se le da una alta resistencia, además de lograr un comportamiento mecánico más seguro. Para el acero A572 existen cinco grados los cuales son: grados 42, 50, 55, 60, 65 que a su

vez están relacionados con el porcentaje de aleación dándole varias propiedades entre sus principales, la tracción.

En la figura 1.2 se observan los requerimientos de la composición química según la norma ASTM A 572/A 572M.

Diámetro, espesor o distancia entre caras paralelas, pulg. [mm] placas y barras	Forma estructural de la brida o espesor de leg. in. [mm]	Grado	Carbono, máx., %	Manganeso, ^B máx., %	Fosforo, ^I máx., %	Azufre, ³ máx., %	Silicio	
							Placas de 1¼ pulg. [40mm] de espesor, formas con brida o con un grosor de pata de hasta 3 pulg. inclusive chapas apiladas, barras, Zess y Tess laminados ⁴	Placas de más de 1¼ pulg. [40mm] Espesor y forma con Espesor de la brida de más de 3 pulg. [75mm]
6 [150]	todos	42 [290]	0.21	1.35 ^P	0.030	0.030	0.40	0.15-0.40
4 [100] ^F	todos	50 [345]	0.23	1.35 ^P	0.030	0.030	0.40	0.15-0.40
2 [50] ^F	todos	55 [380]	0.25	1.35 ^P	0.030	0.030	0.40	0.15-0.40
1¼ [32] ^F	≤ 2 [50]	60 [415]	0.26	1.35 ^P	0.030	0.030	0.40	G
>½ - 1¼ [13-32]	> 1-2 [25-50]	65 [450]	0.23	1.65	0.030	0.030	0.40	G
≤ ½ [13] ^H	≤ 1	65 [450]	0.26	1.35 ^P	0.030	0.030	0.40	G

Figura 1.2: Requerimientos de la composición química para el acero A572.

(Fuente: Norma ASTM A572/ A572M, 2013)

El cromo es un elemento metálico bien conocido por sus buenas propiedades en cuanto a la resistencia a la corrosión. La razón de esto se debe a que el elemento en sí, es un metal muy reactivo, especialmente uno de sus productos solidos de reacción, el óxido de Cr (Cr_2O_3). El Cr está protegido en condiciones de oxidación por la formación de cromita (Cr_2O_3), que actúa como una barrera entre el metal y medio ambiente. Este óxido, que es semiconductor, crece por difusión de los cationes del metal hacia la interfase metal/óxido y transporta estos cationes hacia los espacios vacantes. Los coeficientes de difusión son muy bajos lo cual significa bajas velocidades de crecimiento del óxido. (Beverkog, 1997). Su uso mejora la dureza y resistencia a la tracción, proporciona inoxidabilidad, entre otras propiedades.

Además, incluye manganeso en su composición que por su reducido costo y por su gran aporte a las propiedades, es componente básico en todos los aceros comerciales; es agregado con el objetivo de que éste actúe en la soldadura como agente de desoxidación, desulfuración y neutraliza los efectos nocivos del azufre, reduciendo la tendencia a la fragilidad en caliente permitiendo sea apto para operaciones de conformado, también es un débil formador de carburos pues tiene un efecto moderado sobre la templabilidad y contribuye a su resistencia y dureza. (Colpaert, 2005)

1.2.1. Propiedades del acero estructural

Los aceros tienen muchas propiedades importantes, pero desde un punto de vista estructural las más significativas son el esfuerzo de fluencia, la resistencia a la tensión y la elongación.

1.2.1.1. Esfuerzo de fluencia

Es el límite que alcanza el acero antes de sufrir una deformación plástica permanente, una vez pasado este punto, el acero se deforma y fragiliza.

1.2.1.2. Resistencia a la tracción

Es el máximo esfuerzo de tracción que un acero puede soportar antes de romperse.

1.2.1.3. Elongación

Es el grado en el que un acero es estirado o comprimido antes de que ésta sufra una rotura, es un punto entre la resistencia a la tensión y el esfuerzo de fluencia, éste es representado como un porcentaje de la longitud inicial.

La figura 1.3 muestra las propiedades del acero ASTM A572.

Grado	Límite de Elasticidad, min		Resistencia a la Tracción, min		Elongación Mínima, % ^{B, C, D}	
	ksi	[MPa]	ksi	[MPa]	en 8 pulg. [200 mm]	en 2 pulg. [50 mm]
42 [290]	42	[290]	60	[415]	20	24
50 [345]	50	[345]	65	[450]	18	21
55 [380]	55	[380]	70	[485]	17	20
60 [415]	60	[415]	75	[520]	16	18
65 [450]	65	[450]	80	[550]	15	17

Figura 1.3: Propiedades del acero ASTM A572.
(Fuente: Norma ASTM A572/ A572M, 2013)

1.3. Aplicaciones

Al ser del tipo estructural sus aplicaciones están dentro de esa área, gracias a sus propiedades tienen mucha ventaja y son muy recomendados en construcción de puentes, así como estructuras soldadas, plataformas marinas y petroleras y soportes estructurales. El acero A572 cuenta con varios espesores que deberán ser calculados según la aplicación en la que va a ser usada (Otero, 2010).

Hay aplicaciones en las que el acero A572 destaca y hay otras en las que no, como en la construcción de tanques de alta presión o calderas ya que tiene un uso eficaz en temperaturas menores a 20 °C.

Ya que este acero tiene propiedades mecánicas mejores en comparación a otros del mismo tipo, permite disminuir espesores al momento de construir estructuras soldadas, empernadas o remachadas, dando como resultado una disminución del peso en general. Siendo una ventaja en aplicaciones como, mecanismos de transporte, puentes, carrocerías y estructuras en general.

1.4. Procesos de soldadura

Para este estudio las soldaduras fueron realizadas mediante los procesos SMAW-FCAW, los mismos que se detallarán a continuación. Se explicará brevemente de los materiales de aporte, así como de los gases de protección descritos y utilizados en los WPS's (Anexados) realizados por los autores del trabajo de titulación de referencia.

1.4.1. SMAW (Shield Metal Arc Welding)

Es un proceso de soldadura por arco eléctrico entre un electrodo revestido y un metal base; proceso de electrodo revestido manual en el cual, el arco produce una temperatura aproximadamente de 3500°C en la punta del electrodo, superior a la necesaria para fundir la mayoría de los metales. El calor funde el metal base y el electrodo revestido, de esta manera se genera una pileta líquida o baño de fusión, que va solidificando a medida que el electrodo se mueve a lo largo de la junta como se menciona en (Larry, 2018)

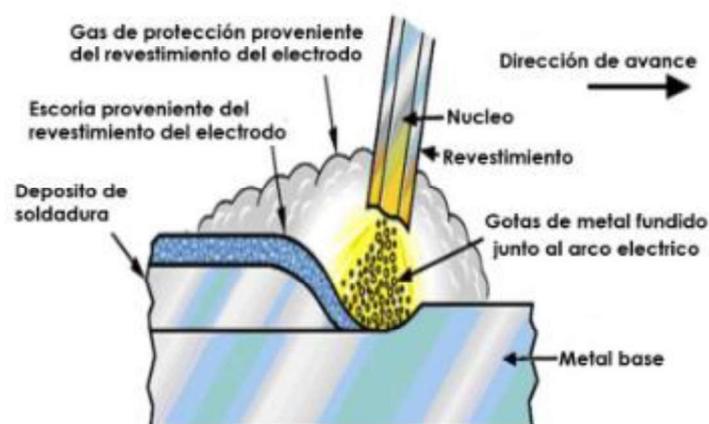


Figura 1.4: Proceso de soldadura por arco eléctrico (SMAW).
(Fuente: http://soldadurayestructuras.com/2184409_Procesos-de-soldadura-y-corte.html)

1.4.1.1. Material de aporte

En la soldadura de electrodos revestidos el amperaje queda fijado por el diámetro del electrodo y tipo de revestimiento, el voltaje por la longitud del arco. Protección del metal fundido a través de la concepción de gas, de la escoria, suministra desoxidantes, proporciona elementos de aleación, facilita el inicio del arco y su estabilidad, establece la forma del cordón y su penetración, además de la posición de soldadura, transmite mayor o menor calor prescribiendo la viscosidad y la fusión de la escoria. Existen varios tipos de electrodos como son: celulósicos, rútilicos, básicos / bajo Hidrogeno, otros utilizados para combatir el desgaste, aceros inoxidables, fundicion de Hierro, de bronce, de cobre e incluso de aluminio.

Para este estudio, y en este proceso se utiliza el electrodo E-8010 cuya estructura está dada en la Figura 1. 5., y la composición química en la Tabla 1.1.

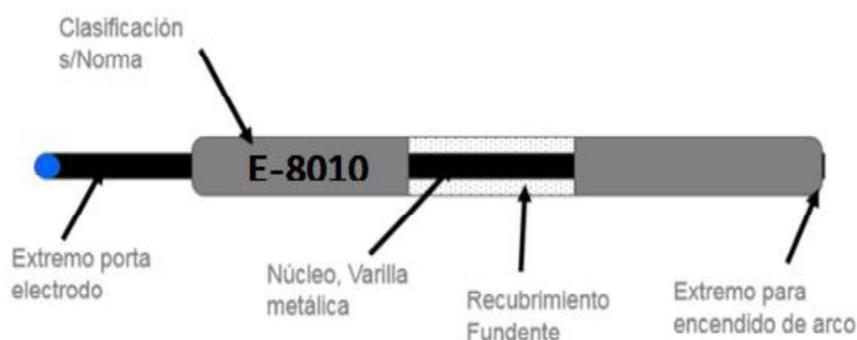


Figura 1.5: Partes del material de aporte del proceso SMAW.
(Fuente: Jeffus Larry, 2018)

Tabla 1.1: Composición química típica del electrodo E-8010.

Requerimientos AWS	% C	% Mn	% Si	% S	% Ni
E-8010	0.15	1.40	0.10	0.01	1.19

(Fuente: Lincoln Electric, 2019)

1.4.2. FCAW - Flux Cored Arc Welding

En (Kalpakjian & Schhmid , 2002) se indica que, es un proceso de soldadura de arco eléctrico que utiliza el arco formado entre un electrodo alimentado continuamente, que es el metal de aporte, y el charco de soldadura. En este proceso se emplea gas; que desciende de ciertos componentes del fundente que está contenido dentro del alambre

tubular, para proteger el metal líquido cuando el arco está encendido; con o sin protección adicional proveniente de un gas proporcionado externamente, y sin la aplicación de presión. Durante el enfriamiento y solidificación del metal de soldadura depositado la protección se con escoria.

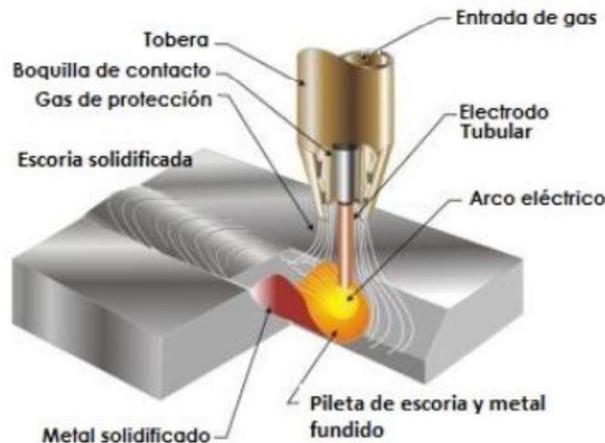


Figura 1.6: Proceso de soldadura de arco eléctrico (FCAW).
(Fuente: <http://soldadurayestructuras.com/proceso-fcaw.html>)

1.4.2.1. Material de aporte

Los materiales en los que se emplean alambres para soldadura tubular son, frecuentemente, aceros al carbono, aceros de baja aleación, aceros inoxidables y fundición. Los alambres tubulares para acero al carbono también se catalogan en una serie de números y letras, según las propiedades mecánicas del depósito de soldadura, y para este estudio se utiliza el E71T-1, diseñado para ser utilizado en conjunto con el gas de protección como el CO_2 , el mismo que tiene la composición química descrita en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2: Composición química típica del electrodo E71T-1.

Requerimientos AWS	% C	% Mn	% Si	% S	% P
E71T-1	0.12 máx.	1.75 máx.	0.90 máx	0.03 máx	0.03 máx

(Fuente: Lincoln Electric, 2019)

Las ventajas de los alambres para soldadura tubular son: sus bajos niveles de pérdida por salpicaduras, fácil eliminación de la escoria y alta resistencia al impacto, las temperaturas extremas y el agrietamiento.

1.4.2.2. Gas de protección

Los gases de protección que suelen utilizarse para este proceso de soldadura son el Dióxido de carbono y mezclas de argón/ oxígeno, debido a que en el trabajo previo se utilizó el primero (CO_2), el mismo que se detalla a continuación.

La mayoría de los hilos tubulares de gran diámetro para soldadura utilizan CO_2 como gas de protección de apoyo. Regularmente se utilizan en soldadura de superficies bastas, con óxidos, cascarillas de laminación, de grandes espesores, éste gas posee dos ventajas por un lado su bajo costo en relación a otros gases y ayuda a la penetración profunda en la junta soldada.

1.5. Tratamientos térmicos post-soldadura (PWHT)

Un tratamiento térmico post-soldadura es un procedimiento que puede ser aplicado por completo a un elemento o también puede ser local; es decir, a la zona soldada y el material contiguo; generalmente utilizado para eliminar o disminuir tensiones residuales y recocer las zonas afectadas por el calor (ZAC) de los procesos de manufactura de un componente, mediante la difusión del hidrógeno del área donde se realiza un proceso de unión o soldadura de materiales (Joshi Suraj, 2013).

Estos tratamientos se ejecutan siempre por debajo de la temperatura crítica A_1 , tienen como objetivo proveer mejoras en las propiedades del conjunto soldado; hay que tomar en cuenta los rangos de temperaturas ya que la soldadura y el ZAC se calientan por debajo de la temperatura de transición durante varias horas, el enfriamiento es un punto importante, este debe tener una tasa constante sobre todo en estructuras con diferentes secciones, ya que se podrían desarrollar nuevas tensiones incluso mayores a las que se intentaba disminuir en un inicio.

La probabilidad de un agrietamiento después de la realización de este tipo de tratamientos se reduce notablemente ya que tiene menor nivel de tensiones residuales, por ello, se consigue reducir al nivel del límite elástico a un tercio de su valor, pero es casi imposible que se eliminen por completo.

Es importante resaltar que, como se define en el ASME VIII en las soldaduras de aleaciones ferríticas, se solicita un tratamiento térmico post-soldadura (PWHT), con el fin de homogenizar la estructura de la junta soldada. En cambio, para las aleaciones no ferrosas

y aleaciones austeníticas se aplica tratamiento térmico PWHT para optimizar la resistencia a su entorno (Adewuyi, 2016).

1.5.1. Tratamiento térmico de recocido (TA)

Para el tratamiento térmico de recocido habitualmente el calentamiento se hace a una temperatura ligeramente superior a A_3 y el enfriamiento es lento, por lo general dentro del horno. Su objetivo es ablandar el acero, para regenerar su estructura o eliminar tensiones internas (Sturla, 2002). La figura 1.7., muestra el ciclo del tratamiento. El recocido o tratamiento normalizado se ejecutan con el propósito de aliviar los esfuerzos residuales del componente de trabajo causados por los procesos de manufactura.

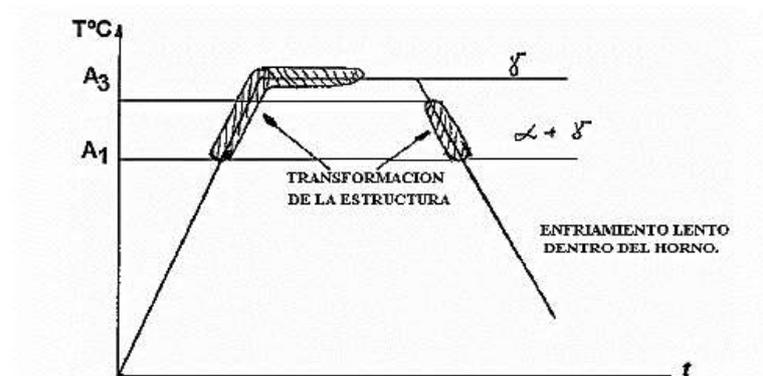


Figura 1.7: Ciclo térmico utilizado en un tratamiento térmico de recocido.

(Fuente: Ramírez, 2008)

Se aplica este tratamiento con el objetivo de:

- Recristalizar los metales trabajados en frío.
- Aliviar los esfuerzos residuales.
- Alterar la estructura del material para conseguir las propiedades mecánicas deseadas, ablandando el metal.
- Mejorar la maquinabilidad de los componentes.

Tiene como ventaja ayudar a reducir la distorsión y las variaciones dimensionales que pueden resultar en las partes que fueron sometidas a esfuerzos.

1.5.2. Tratamiento térmico de alivio de tensiones a $275^{\circ} C$ (TR).

Generalmente los métodos para aliviar tensiones residuales se lo pueden realizar mediante dos vías: la térmica y mecánica. Para este estudio se lo realiza vía térmica, pues este

tratamiento, es ampliamente utilizado en la industria después de realizada las soldaduras, consiste en calentar los conjuntos soldados hasta una temperatura inferior a la de transformación y mantenerlos en ella un tiempo suficientemente largo (Figura 1.8.), como para que se uniforme en toda la pieza y puedan efectuarse los reajustes dimensionales necesarios para establecer el estado de equilibrio a los nuevos valores de la tensión de fluencia correspondiente a dicha temperatura.

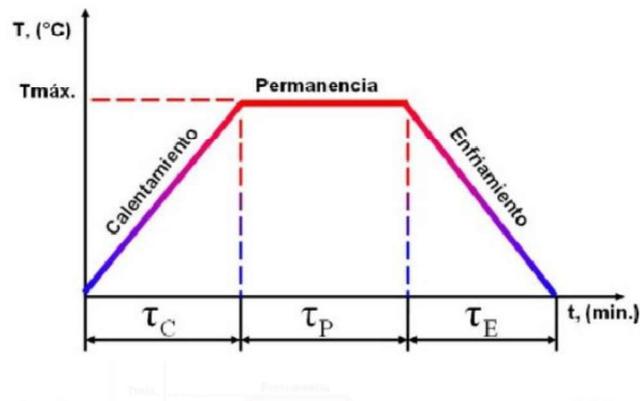


Figura 1.8: Ciclo térmico utilizado en el tratamiento de alivio de tensiones residuales.

(Fuente: Propia)

1.6. Generalidades de la corrosión

El deterioro de un metal que reacciona químicamente al ambiente al que está expuesto se puede definir como corrosión, la corrosión en los metales es muy común ya que tienen electrones libres y estos pueden establecer dentro de su estructura celdas electroquímicas, la velocidad a la que se da la corrosión depende de factores como la temperatura, el medio, las concentraciones de productos y reactivos.

Medios en que los metales experimentan corrosión puede ser el agua, atmósfera, soluciones químicas o propios metales líquidos al que son expuestos.

La vida útil de los materiales y por ende de los equipos se reduce por la presencia de la corrosión, en la actualidad existen métodos muy buenos para la prevención y detección de la misma, sin embargo, es casi imposible que la corrosión sea eliminada por completo, es por eso que las personas encargadas se centran más en el control de la corrosión que en la eliminación del mismo.

Todos los metales y las aleaciones presentarán corrosión provocando gastos no solo económicos sino también humanos, al existir una gran variedad de metales se puede escoger cual tiene un mejor efecto dependiendo de la aplicación a la que será sometido.

Algunos de los posibles aspectos humanos y económicos que se pueden presentar son:

Cambio del equipo que ha sufrido corrosión.

Mantenimientos correctivos y preventivos excesivos en equipos que tiene corrosión.

Paro imprevisto de producción por fallos de equipo.

Aumento de medidas de seguridad lo que genera una disminución de la eficiencia.

Daños de equipos secundarios que trabajan en conjunto con el equipo que tiene corrosión.

Condiciones insalubres de operación y trabajo.

Contaminación del área de trabajo y por ende del producto.

1.6.1. Elementos que intervienen en la corrosión

En el proceso de corrosión intervienen varios elementos, a continuación, se detallan los principales:

Temperatura: un cambio de este aspecto afecta directa o indirectamente a la corrosión ya que la temperatura está relacionada con la velocidad en la que las reacciones químicas se dan en el material, si la temperatura es muy alta o muy baja la humedad que tenga el material cambiara produciendo reacciones con el oxígeno, otros gases u otros medios que resultan ser corrosivos.

Estado de la superficie: la superficie puede contener elementos diferentes al material por una deficiente limpieza de la misma lo que influye en el inicio y desarrollo de la corrosión.

Ambientes contaminados: es un factor que también influye ya que la presencia de sustancias en el ambiente puede apresurar el efecto de la corrosión.

Tiempo: existen diferentes casos de corrosión por lo general tienen una relación lineal, es decir mientras se incrementa el tiempo de exposición del material incrementa la tasa de corrosión.

Diferencia de potencial: cuando existen dos materiales expuestos a mismas condiciones, el material que tenga mayor potencial se corroerá para proteger al material que tenga potencial menor.

La corrosión se da de diferentes maneras que son muy variadas, pero de una forma muy general se la puede identificar de 3 formas:

Mecanismo de corrosión: es decir si se da por reacción química o electroquímica.

Apariencia del material corroído: la corrosión se puede dar a la misma velocidad en toda la superficie del metal apreciando una corrosión uniforme o a su vez puede ser localizada es decir se puede localizar ciertas áreas del metal corroídas y otras no.

Naturaleza de la sustancia corroída: es decir corrosión seca o húmeda, se desarrolla por la presencia de gases a temperaturas elevadas mientras que para el otro caso se requiere de un líquido o humedad, respectivamente.

1.6.2. Tipos de corrosión

Se conoce que la mayoría de metales pueden regresar a su estado original o más conocida en forma de óxido, ya que como se mencionó en párrafos anteriores la corrosión del metal es principalmente una reacción electroquímica en la interfaz entre el material y su medio ambiente (Gómez de León, 2004), y esto permite diferenciar los tipos y procesos de corrosión; para lo cual, se clasifica en las siguientes categorías: corrosión generalizada, corrosión localizada, y otros tipos, ya que son los que comúnmente se presentan en los aceros y para ello se ilustran en la figura 1.9.

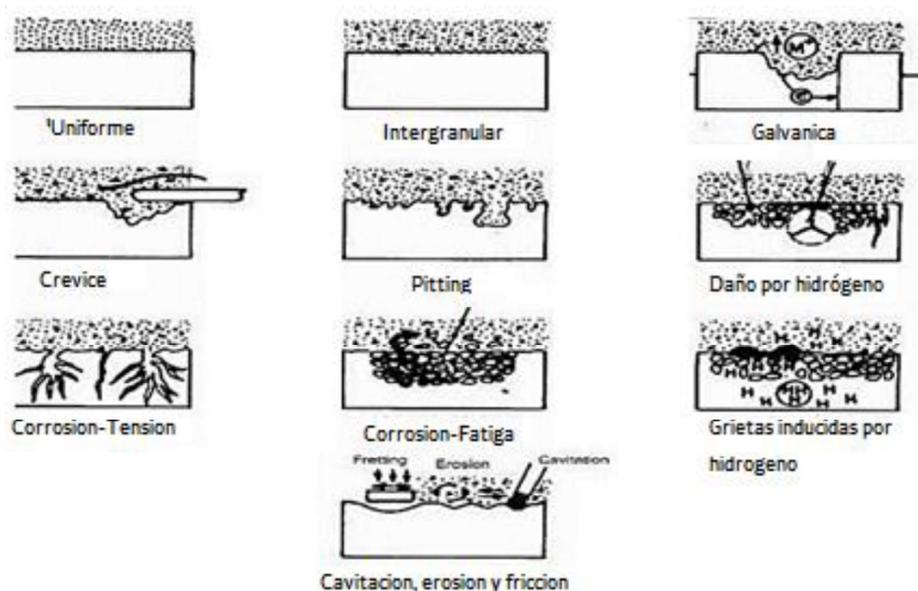


Figura 1.9: Tipos de corrosión originados en los metales.
(Fuente: Gómez, 2004)

1.5.2.1. Corrosión generalizada

Este tipo de corrosión se presenta a través de toda la superficie del material deteriorándolo de manera uniforme, razón por la cual también se le conoce como corrosión uniforme. Por ende, este proceso es el que mayor pérdida de material provoca, pero tiene como ventaja que es fácil de detectar o predecir, así como controlar (Aperam, 2014). Este tipo de corrosión se encuentra en materiales usados para construcción y, la velocidad de corrosión es altamente afectada por la presencia de impurezas y las diferentes fases del material lo que genera diferencia de potenciales dando lugar a pequeños electrodos, por lo tanto, a la corrosión.

1.5.2.2. Corrosión localizada

A diferencia de la anterior, este tipo de corrosión es complicada detectarla ya que solo se presenta en zonas específicas del material influenciada por la naturaleza, la geometría y las condiciones del entorno del material. Estos procesos de corrosión comúnmente se dan en los metales galvánicos, por fisuras, por picaduras, por cavitación e incluso microbiológica (Andrade, 1982).

1.5.2.3. Corrosión galvánica

Existe mediante unión, física o eléctrica entre metales de diferente naturaleza, los cuales, en la presencia de un electrolito, constituyen una celda electroquímica, en el que como se conoce el material de menor potencial electroquímico se corroerá.

1.5.2.4. Corrosión por fisuras

Parecida a la corrosión galvánica, la cual se genera en zonas estrechas en la cual la concentración de oxígeno es menor en relación a todo el sistema, y cuyo efecto provoca que estas zonas actúen como un ánodo, dando origen al proceso de corrosión, en las fisuras (Bilurbina, Iribarren, & Liesa, 2003).

1.5.2.5. Corrosión por cavitación

Este proceso ocurre en sistemas de transferencia de líquidos, donde por variaciones de presión en el entorno, se causan flujos turbulentos que crean burbujas de aire, las cuales implosionan contra el material, perjudicando la capa de pasivación, dando cabida al desarrollo del proceso de corrosión, de forma similar a la corrosión por picaduras, cuya diferencia se nota, en que el resultado de la cavitación es de mayor tamaño (Revie, 2011).

1.5.2.6. Corrosión microbiológica

La Corrosión Microbiológica, ocurre como resultado directo o indirecto de la actividad de los organismos vivos (hongos, bacterias, mohos), estos pueden actuar como aceleradores del proceso corrosivo, se produce generalmente en medios acuosos en donde los metales están sumergidos o flotantes, por lo mismo es un tipo de corrosión común (Medina, 2007).

1.5.2.7. Corrosión – tensión

Acontece cuando en un material, sometido a esfuerzos de tensión, sean internos o externos generan pequeñas fisuras, que dan inicio al proceso de corrosión (Revie, 2011). El material que permanece en ambos fenómenos, se deteriora con mayor rapidez, perdiendo mayor cantidad de material ya que la mismas se propaga a través de toda la superficie, generando una corrosión uniforme durante el proceso.

1.5.2.8. Corrosión – fatiga

Ahora bien, este tipo de corrosión se presenta cuando el material solamente está sometida a esfuerzo cíclicos y fluctuantes externos, donde dicha tensión deteriora al material rápidamente combinando estos dos fenómenos.

1.5.2.9. Otros tipos de corrosión

También existen muchos tipos de corrosión que no caen dentro de las categorías anteriores. Algunos de estos son, la corrosión selectiva, la corrosión filiforme y la oxidación; las cuales actúan sobre aleaciones metálicas de alta humedad que pueden tener en algunos casos recubrimientos orgánicos como pinturas los cuales puedes ser rayados y hacer de estos puntos o filamentos delgados donde se da origen a procesos de corrosión como picaduras dejando así superficies porosas, mismas que si en algún momento llegan a intervenir con gases oxidantes que generan que el material se fragilice y su tiempo de vida útil disminuya. Suelen presentarse en materiales como el latón o zinc (Bilurbina, Iribarren, & Liesa , 2003).

1.7. Corrosión por picadura (pitting)

Este tipo de corrosión es localizada, se presenta en un área pequeña en relación a toda la superficie del metal. Por lo general las picaduras son difíciles de detectar debido a su tamaño muy pequeño, estas tienen un desarrollo muy lento, pero una vez iniciadas las picaduras estas crecen de forma rápida en el sentido de la gravedad, haciendo un túnel hacia el interior del metal. La corrosión por picadura se presenta por la formación de

orificios en una superficie relativamente no atacada, las picaduras pueden tener varias formas, el propio avance de las picaduras es responsable de la forma que tienen estas (García, 2016). En la figura 1.10. se ve una representación de las picaduras en los aceros.



Figura 1.10: Representación de picadura en una placa de metal.
(Fuente: García, 2016)

Las picaduras son efecto de un proceso electroquímico que está ubicado en la superficie de un metal, debido a la presencia de cloruros y sulfuros en un electrolito que ocasionan que la capa pasiva del acero se rompa, la capa pasiva es una capa de óxido que se forma en la superficie del acero impidiendo que la corrosión se presente, si esta capa no se logra regenerar el acero queda desprotegido como muestra la figura 1.11.

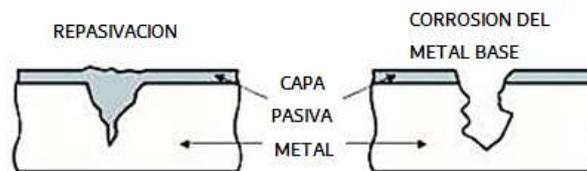


Figura 1.11. Corrosión por picadura y ruptura de la capa pasiva.
(Fuente: Aperam, 2014)

Si mayor es la superficie atacada, la corrosión será más superficial, es por eso que a veces se usa el factor de picadura para poder expresar la profundidad de la picadura. Sin embargo, calcular las picaduras es dificultoso, una razón es por la cantidad de picaduras que se presentan en el metal, las picaduras pueden ser muy perjudiciales ya que estas perforan al metal (Ortiz, 2011).

Al ser un proceso electroquímico la superficie actúa catódicamente ya que tiene mayor oxigenación mientras que la picadura tiende a comportarse anódicamente, por ejemplo, en un medio salino como el cloruro de hierro el avance de picadura se explica por la presencia

de cloruros (aniones), estos ingresan en el interior del orificio donde estos forman cloruros del metal, también los iones metálicos se hidrolizan formando iones de hidrógeno o hidróxidos modificando el pH (Gómez de León, 2004), en la figura 1.12. se muestra la reacción electroquímica que se forma en la picadura.

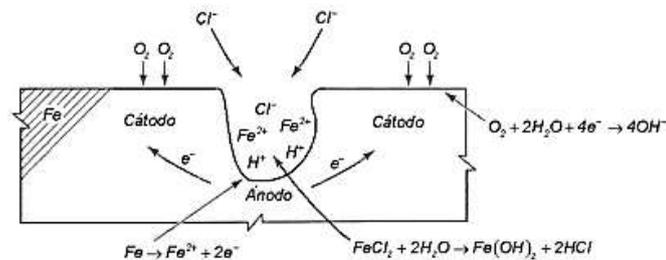


Figura 1.12. Reacción electroquímica de la corrosión por picadura.

(Fuente: García, 2018)

El pH ácido dificulta la formación de capas protectoras o la capa de pasividad dejando que la picadura siga formándose.

1.7.1. Parámetros que influyen en la corrosión por picaduras.

Existen varios elementos que intervienen para que la picadura este presente, estos pueden ser: factores metalúrgicos y estructurales, fenómenos de polarización, factores ambientales, además de otras causas como microorganismos por presencia de productos de corrosión o depósitos, etc.

1.7.1.1 Factores estructurales y metalúrgicos.

Estos factores actúan como nucleación para que se inicie la corrosión por picadura.

- Estructuras de defectos.
- Parámetros que se pueden dar en la soldadura como salpicaduras, inclusiones, golpes de arco, fases múltiples, composición diferente dentro de una misma fase, etc.
- Descomposición de la capa pasiva o del revestimiento aplicado al metal.
- No homogeneidad en la aleación causada por segregación o por trabajos en frío.

1.7.1.2 Microorganismos, productos de corrosión y depósitos

En el proceso de soldadura se pueden fijar microorganismos estos pueden formar una reacción con el metal dando como resultado que el metal no forme su capa pasiva y que se presenten severas picaduras.

1.7.1.3 Factores ambientales

Estos son bien conocidos al momento de formar picaduras tal es el caso de sales como los cloruros ya que los iones cloruros se acumulan en zonas anódicas del metal eliminando la capa pasiva o el recubrimiento en dichas zonas, también las picaduras se presentan en ambientes marinos, esto por su composición química, microorganismos y por el pH del mar hacen que la picadura se presente (Segarra, 2015).

1.8. Resistencia a la corrosión de los materiales

Las propiedades de los materiales pueden variar dependiendo las condiciones a las cuales éstos estén sometidos, y para apreciar la resistencia a la corrosión es común realizar ensayos de laboratorio donde se controla tiempos de permanencia en medios que permitan simular el entorno adecuado como sales y compuestos artificiales, cambio de peso, temperaturas, y todo aquello que permita valorar cualquier característica del material relacionada con la destrucción química desarrollada antes, y después de la interacción con el medio a probar (Andrade, 1982).

En la Tabla 1.3 se brinda información sobre la resistencia a la corrosión del metal en estudio.

Tabla 1.3. Propiedades anticorrosivas del acero al carbono.

Nombre Común	Composición	Propiedades Anticorrosivas
Acero al carbono	0.3-1.2 % de carbono	Se corroen en el aire y aguas naturales, pero resisten el ácido sulfúrico concentrado y las soluciones salinas a temperaturas normales.

(Fuente: <http://www.sabelotodo.org/metalurgia/resiscorrometales.html>)

La corrosión acelerada tiene algunas finalidades mismas que son: adquirir información sobre el comportamiento a la corrosión de un material en un entorno específico, efectuar controles de calidad, pronosticar la vida útil de trabajo del material, además de simular cargas y mecanismos que induzcan a la degradación.

Los indicadores que se deben controlar, según (Uhlig, 2011) en los ensayos de corrosión acelerada son:

- Aspecto visual de la materia prima tanto antes como después de los ensayos, lo que permitirá observar productos de corrosión indeseables.
- Variación en el peso de las probetas ensayadas.
- Tasa de corrosión
- 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.
- Variaciones y ciertas propiedades mecánicas o físicas como por ejemplo la resistencia a la tracción, conductividad eléctrica, tenacidad, entre otros.
- Cambios en indicadores electroquímicos como potenciales de corrosión.

El proceso acelerado de corrosión que ocurre durante una prueba bajo condiciones controladas puede aportar con estimaciones razonables, cuantitativos y cualitativos de la corrosión frente a un entorno de servicio (Ortiz, 2011).

2. METODOLOGÍA

En el presente trabajo se estudia y analiza el proceso de corrosión que se puede presentar sobre las juntas soldadas de acero estructural ASTM A572 que han sido sometidas a tratamientos térmicos.

Se realiza una serie de ensayos de corrosión que permiten sustentar y obtener información necesaria, para lo cual se utilizan 24 probetas obtenidas de la soldadura de placas de acero estructural con denominación A572 G50 de 40 mm de espesor, mediante el proceso mixto de soldadura conformado por un pase de raíz con proceso SMAW y material de aporte E8010, los posteriores pases con el proceso FCAW y material de aporte E71T-1, donde el proceso se repite para ambos lados de la junta; en base a normas internacionales, se asigna el número de especímenes requeridos para cada ensayo tales como: ensayos de corrosión y análisis metalográfico.

2.1. Procedimientos previos a la obtención de probetas

Para obtener las probetas fue necesario realizar las soldaduras a placas en base a las normas AWS D1.1, bajo parámetros y todas las variables que se sustentan con la documentación correspondientes a los WPS's, PQR y WPQ que se indican en el ANEXO 1. Cabe recalcar que existen tres placas mismas a las que se les realiza tratamientos térmicos post-soldadura, dispuesto de la siguiente manera: a dos de ellas se les realiza un tratamiento térmico para aliviar tensiones residuales y recocido, respectivamente, mientras que a la restante no se le aplica ningún tratamiento térmico post-soldadura; y dichos parámetros se encuentran detallados en el ANEXO 2.

La figura 2.1. muestra las placas utilizadas para realizar los tratamientos térmicos.



Figura 2.1: Placas soldadas y tratadas térmicamente. 1) Placa con tratamiento recocido. 2) Placa sin tratamiento 3) Placa con tratamiento térmico para aliviar tensiones residuales.

(Fuente: Propia)

2.1.1. Ensayo de tintas penetrantes

El ensayo para las placas fue realizado en el Laboratorio de Ensayos no Destructivos de la Facultad de Ingeniería Mecánica, obteniendo el informe respectivo, que se muestra en el ANEXO 3.

2.1.1.1. Realización del ensayo

Se empezó con la limpieza de las placas a examinar, ya que se necesita retirar cualquier contaminante de la superficie.

Se aplicó el líquido penetrante seleccionado, a temperatura ambiente.

Se dejó que el líquido penetre e ingrese a las discontinuidades por 10 minutos ya que es el tiempo estimado mínimo para materiales forjados, metales rolados y soldaduras.

Se removió el exceso de penetrante sobre las placas.

Se aplicó el revelador húmedo en capas uniformes para que de una correcta información.

Se inspeccionó las piezas desde el momento en que se aplica el revelado.

Se realizó la limpieza final de la pieza y del lugar ocupado.

Se emitió el informe de inspección de discontinuidades superficiales mediante líquidos penetrantes.

Este proceso se realiza para los dos lados del cordón de soldadura y para la parte superior e inferior de cada una de las placas.

2.1.1.2. Materiales utilizados

En la Tabla 2.1 se detallan las especificaciones de los materiales con los cuales se realizó el ensayo mediante líquidos penetrantes.

Tabla 2.1: Materiales utilizados en el ensayo.

Materiales	Figura	Características
Kit de líquidos penetrantes MET-L-CHECK		Marca: MET-L-CHECK Penetrante: Rojo VP-30 Removedor: B-59A Revelador: D-70

(Fuente: Propia)

2.1.2. Equipos utilizados durante los procedimientos previos

Para el proceso de corte se emplean varios equipos cuyas especificaciones técnicas se describen en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Equipos utilizados para el proceso de corte de las probetas.

Equipo	Figura	Características
<p>Sierra de Disco W.J. SAVAGE CO.INC</p>		<p>Voltaje: 230/460 V Amperaje: 26/13 A 10 HP 1745 rpm Frecuencia: 60 Hz</p>
<p>Sierra recta UNIZ</p>		<p>Voltaje: 220/440 V Amperaje: 2.8/1.4 A 1 HP 1750 rpm Ciclos: 60 Refrigerante: Taladrina</p>
<p>Cortadora con Hilo de Tungsteno YGS-64C</p>		<p>Voltaje: 220V/ 3KW Amperaje: 2.8A 2 HP Frecuencia:50-60 Hz</p>

(Fuente: Propia)

Se realiza una rectificación de las probetas para tener superficies laterales homogéneas, para lo cual se emplea el equipo cuyas características se detallan en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Rectificación de superficies.

Equipo	Figura	Características
<p style="text-align: center;">Rectificadora DoALL</p>		<p style="text-align: center;">Modelo: DH-612 Voltaje; 220 V Amperaje: 15/3 A Ciclos: 60 1 HP</p>
<p style="text-align: center;">Limadora Eléctrica BILBAO</p>		<p style="text-align: center;">Motor asíncrono Tipo: MT.100.L-4 Frecuencia: 60Hz Voltaje: 220/380 V Amperaje: 11.5/6.6 A 4CV 4.20 r/m</p>

(Fuente: Propia)

Finalmente se realiza la limpieza de la capa protectora (Calamida) que tiene el acero desde su fabricación, todo aquello con el fin de que no intervenga nada en el contacto con el ácido en donde se sumergen.



Figura 2.2. Probetas totalmente libres de protecciones.

(Fuente: Propia)

2.2. Ensayo de corrosión

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

Este trabajo experimental aplica el método de corrosión por pruebas de inmersión parcial, el cual tiene como fin analizar el tipo de comportamiento del material base, cordón de soldadura y la zona afectada por el calor mediante la exposición de los especímenes de prueba a ambientes corrosivos como es el caso del cloruro férrico en una concentración de 5%, con la finalidad de analizar tanto las variaciones de masa o cambios en la superficie como en la microestructura.

2.2.1. Probetas para ensayos de corrosión

Se obtienen 4 probetas de cada tratamiento térmico que se realizó en el acero ASTM A572 utilizado en el trabajo de titulación "Análisis comparativo de las propiedades mecánicas de juntas soldadas de acero ASTM A572 tratadas térmicamente" (Campos & Jaramillo, 2019)

La figura 2.3. muestra las medidas de las probetas para el ensayo de corrosión.

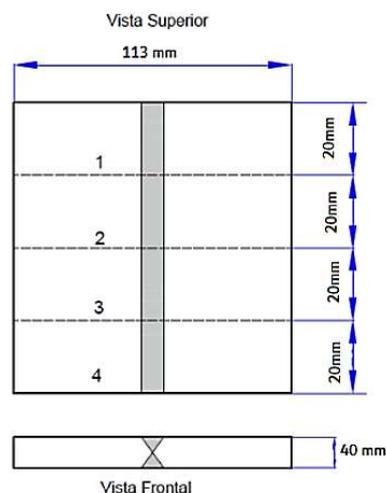


Figura 2.3: Dimensiones de las probetas de corrosión.

(Fuente: Propia)

Aprovechando que se había seleccionado un bisel en X, debido a que evita la deformación en espesores grandes; se aprovecha de éste diseño y se divide el cordón de soldadura en

dos lados A (superior) y B (inferior) como muestra la figura 2.4., dando un total de 24 especímenes para el ensayo de corrosión.

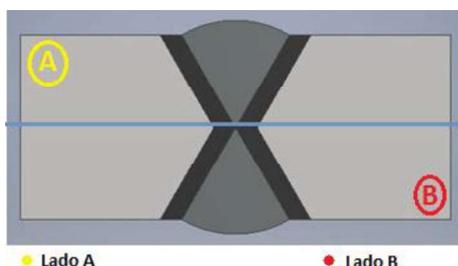


Figura 2.4. Disposición del cordón de soldadura.

(Fuente: Propia)

2.2.2. Realización del ensayo de corrosión

Como se mencionó para este tipo de ensayos se deben tomar en cuenta parámetros como: tiempo de corrosión, composición química y concentración de la solución, temperatura y volumen. Para este trabajo experimental el tiempo de ensayo de corrosión tiene una duración total de 432 horas (18 días) para lo cual se destinó 216 horas (9 días) para el lado A y las 216 horas restantes para el lado B, con un periodo de revisión de cada 72 horas (3 días), respectivamente.

La composición química de la solución está constituida por 5 partes en peso de cloruro férrico disuelta en 95 partes de agua destilada; como se indica en la Norma ASTM G48-11, adjunta en las referencias bibliográficas. Estos compuestos químicos se muestran en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Compuestos químicos para la solución.

Descripción	Imagen	Descripción	Imagen
Agua destilada 333.33 ml		Cloruro férrico 166.39 gr (de la imagen se debe despreciar peso de los empaques)	

(Fuente: Propia)

La temperatura del ensayo está en un rango de 15-21 °C, tomada mediante el uso de termómetros ubicados en cada una de las cámaras.

Aprovechando que el diseño de la junta se presta para la división de dos lados, para lo cual se sumerge primero el lado A, y después de transcurrido el tiempo de estudio se cambia de lado. Se debe evitar el contacto de los especímenes y la porta probetas, para ello, durante el montaje se coloca material aislante en las partes que no tendrán contacto con la solución como se muestra en la figura 2.5.



Figura 2.5. Protección de áreas sin contacto.

(Fuente: Propia)

En la Figura 2.6., se muestra la disposición de las probetas en las cámaras, las mismas que fueron separadas e identificadas según el tipo de tratamiento térmico al que fueron sometidas las probetas; resultando 4 especímenes en cada porta probetas, además de colocar termómetros para llevar registros de la temperatura.



Figura 2.6. Diseño y distribución en las cámaras.

(Fuente: Propia)

2.2.3. Velocidad de corrosión

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

$$W = W_i - W_f$$

Ecuación 2.1. Cálculo de la variación de masa
(Fuente: Sáenz, Castillo, & Márquez, 2010)

Donde:

W : Pérdida de peso [gr]

W_i : Peso inicial [gr]

W_f : Peso final [gr]

La velocidad de corrosión se determina a partir de la siguiente Ecuación 2.2., establecida en la norma ASTM G1-03 "Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens".

$$VC = \frac{K * W}{A * d * t}$$

Ecuación 2.2. Fórmula para calcular la velocidad de corrosión
(Fuente: ASTM G1-03, 2017)

Donde:

VC : Velocidad de corrosión

W : Pérdida de peso [gr]

K : Constante de transformación de unidades [8.76×10^4 mm/año]

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

d : densidad del material [g/cm^3] [Acero A572= $7.85g/cm^3$]

t : tiempo de exposición en horas [h]

Para lo cual los valores de la constante variarían de acuerdo a las unidades que se requiera:

Tabla 2.5. Valores de K a partir de las unidades a obtener.

Unidades de la velocidad de corrosión	constante K en corrosión
milésimas de pulgada por año (mpa)	$3,45 \times 10^6$
pulgadas por año (API)	$3,45 \times 10^3$
pulgadas por mes (ipm)	$2,87 \times 10^2$
milímetros por año (mm/y)	$8,76 \times 10^4$
micrómetros por año (um/y)	$8,76 \times 10^7$
picómetros por segundo (pm/s)	$2,78 \times 10^6$

(Fuente: ASTM G1-03, 2017)

A continuación, se muestra un ejemplo de cálculo empleado para hallar la velocidad de corrosión, y para este trabajo se utilizan los siguientes datos:

$$VC = \frac{8.76 \times 10^4 \left[\frac{mm}{año} \right] * (665.9 - 648.9) [gr]}{2260 [mm^2] * 7.85 \left[\frac{g}{cm^3} \right] * 432 [gr]}$$

$$VC = 0.1943 \left[\frac{mm}{año} \right]$$

2.2.4. Equipos y materiales para el ensayo de corrosión

Para la elaboración de las cámaras se utiliza acrílico de color blanco de 3mm de espesor, con dimensiones de 2m x 2m, cuyas importantes características se consideran en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6: Características del acrílico blanco.

Aislación eléctrica	Similar a la porcelana y al mármol
Aislación térmica	Soporta temperaturas hasta de 140° C
Combustibilidad	Propagación muy lenta similar a maderas duras.
Conductividad Térmica	Cuatro veces menor al vidrio.
Maquinado	Usado para procesos de termo formado, buen acabado superficial, se puede cortar con láser.
Peso	Es 50% más liviano en relación al vidrio y aluminio
Propiedades químicas	Resistente a sustancias corrosivas, agua de mar, ácidos diluidos, sales diluidas, alcohol al 50%, detergentes, aceites, amoníaco y glicerina
Durabilidad	10 años

(Fuente. Información Técnica- Acrílico 2011)

Para el armado se utiliza el pegamento a base de disolvente, la más común es Weld-On, como se muestra en la figura 2.7., que viene con su respectivo recipiente para la mezcla y posterior aplicación.



Figura 2.7. Pegamento para acrílico.
(Fuente: Propia)

Se opta por elaborar cámaras del material antes mencionado con un dimensionamiento como se detalla en la Figura 2.8. Cabe mencionar que en cada una las divisiones se incluye dos soportes laterales para mantener la portaprobetas a una altura de 3 cm de la base, la misma que ayuda a que no se sumerja más que la superficie de cada lado de los especímenes.

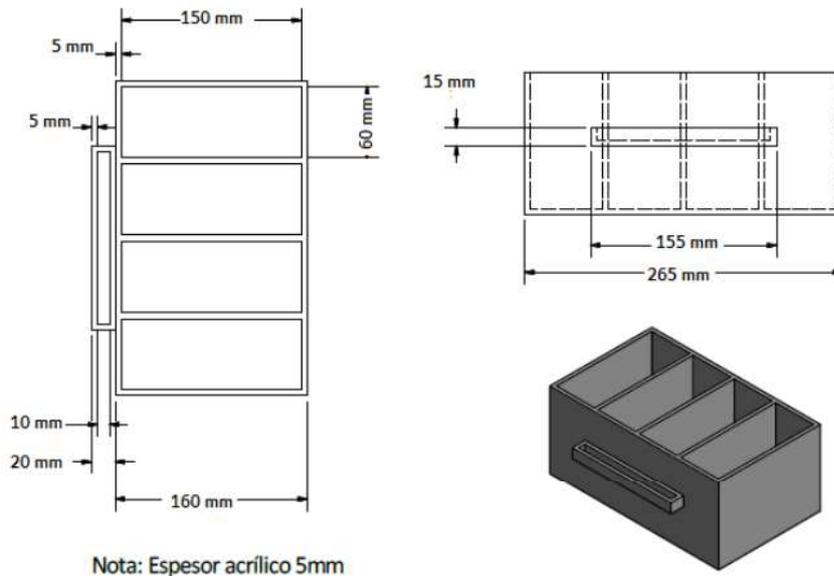
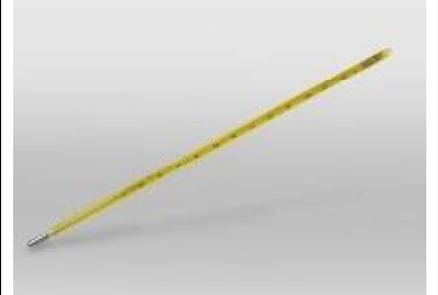


Figura 2.8. Dimensionamiento de las cámaras.
(Fuente: Propia)

Para la medición de las temperaturas se utiliza termómetros con las especificaciones detalladas en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7. Especificaciones de instrumento de medida de temperatura.

Imagen	Descripción
	<p>Termómetros varilla inmersión total mercurio Marca: AMARELL Código: G10626 Rango: -10 a 50 °C Tipo de lectura: Análoga</p>

(Fuente: Propia)

Para las mediciones de la masa tanto los especímenes como del cloruro férrico utilizados durante el ensayo de corrosión se manejó dos balanzas digitales cuyas especificaciones técnicas se encuentran detalladas en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8. Especificaciones técnicas de las balanzas.

Imagen	Especificaciones
	<p>Balanza digital Marca: BBADAM Modelo: N/A Capacidad: 0-6000 [g] Apreciación: 0.01 [g] Tipo de lectura: Digital</p>
	<p>Balanza digital Marca: N/A Modelo: N/A Capacidad: 0-500 [g] Apreciación: 0.01 [g] Tipo de lectura: Digital</p>

(Fuente: Propia)

2.2.5. Procedimiento para ensayo de corrosión

Preparar las probetas, limpieza mediante desoxidante, jabón neutro y alcohol con 99.8% de pureza para inhibir cualquier sustancia que interfiera con el proceso de corrosión, además de medir la masa inicial de cada espécimen

Colocar material aislante en las partes donde no se desea que exista contacto con la solución, aislar además con el mismo material a los apoyos del portaprobetas.

Preparar la solución química tomando en cuenta tanto la concentración como se indica en Norma ASTM G48-11, método B, (ANEXO IV), como las cantidades necesarias para que solo conserve contacto la cara superior del espécimen. Para lo cual se calcula el área de cada una de las divisiones y la altura a la se desea este la solución, colocando 277.77 ml en cada espacio.

Tomar y verificar la temperatura a la cual se encuentra en ese momento para llevar un registro.

Verter la solución química tomando las precauciones debidas, y situar los especímenes en cada uno de los espacios. Se disponen instalar 4 especímenes de cada tratamiento térmico en cada una de las cámaras, y colocar una tapa al a cada cámara.

Al cumplir el periodo de revisión se desmontará las probetas para tomar fotografías y controlar el avance de corrosión mediante el microscopio OLYMPUS SZX7.

Limpiar las probetas y medir nuevamente su masa.

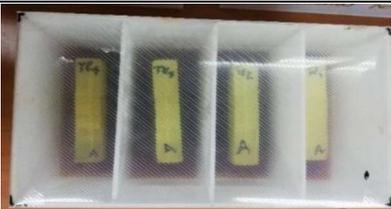
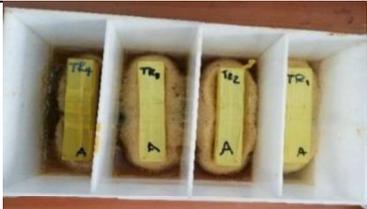
Limpiar en su totalidad las cámaras de corrosión.

(Se repetirá este proceso, mientras se cumple el periodo estipulado tanto para el lado A como el B)

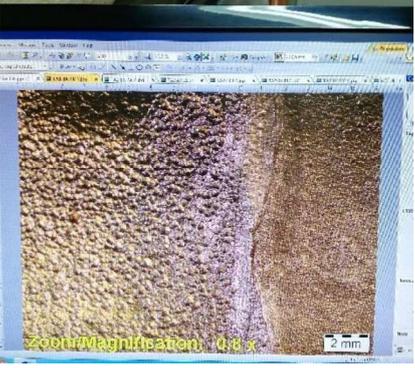
Evaluar y seleccionar una probeta de cada grupo de tratamientos, se destacarán las probetas que presentaron mayor porcentaje de corrosión en función a los siguientes parámetros: variación de masa, análisis de corrosión superficial y tiempo de exposición.

La Tabla 2.9 muestra el procedimiento de evaluación del ensayo de corrosión.

Tabla 2.9: Procedimiento de evaluación de corrosión cada 3 días.

	
<p>Dimensionar las probetas de corrosión.</p>	<p>Limpiar las superficies de las probetas.</p>
	
<p>Aislar y medir distancias de los topes del porta probetas</p>	<p>Pesar las masas iniciales de cada especimen.</p>
	
<p>Aislar las areas de no contacto, e identificarlas según el tratamiento y numero de especimen.</p>	<p>Realizar la mezcla de la solución química y verter el volumen ya indicado en cada espacio.</p>
	
<p>Montar las probetas dentro de las camaras y colocar una tapa.</p>	<p>Realizar la revisión después de transcurridas las horas de exposición.</p>

Continuación de Tabla 2.9.

	
<p>Inspeccionar visual del avance del proceso de corrosion.</p>	<p>Limpiar totalmente y cambiar de solucion de las camras .</p>
	
<p>Limpieza de cada una de las probetas con jabon neutro.</p>	<p>Medir la variacion de masas de cada una de las probetas.</p>
	
<p>Tomar fotografias de las zonas estudiadas en el microscopio.</p>	<p>Visualizar y contar las picaduras que se generaron durante el tiempo de exposicio.</p>
	
<p>El proceso se repite para el lado B, despues del tiempo transcurrido.</p>	<p>Seleccionar una probeta de cada grupo/tramiento, para realzar el resto de ensayos.</p>

(Fuente: Propia)

Finalmente, al cumplir con el tiempo total del ensayo se selecciona una probeta de cada grupo y se realiza el análisis en el microscopio metalográfico, ensayos de dureza y microdureza, además de realizar control de las tablas con datos de las variaciones de masa y parámetros de ensayo. ANEXO V.

2.3. Análisis metalográfico

Este tipo de análisis permite recoger información de la microestructura del material base, ZAC, y cordón de soldadura del acero estructural ASTM A572; también, la dureza y micro dureza con el fin de ver cambios en el material.

2.3.1. Metalografías

La metalografía del material ayuda a determinar la estructura interna del metal para poder relacionarla con las propiedades mecánicas, físicas y químicas del mismo. esto con el fin de poder establecer las fases presentes en el material base, los cambios de fase que se dan en la zona del material de aporte y en el ZAC, además del tamaño de grano y de los cambios que se pudieron dar en la soldadura y sus posteriores tratamientos térmicos.

2.3.1.1. Probetas para análisis metalográfico

Para la elaboración de las probetas se escoge un espécimen de cada tratamiento térmico, el más demostrativo, cortar el material base con el cordón de soldadura, dejando a la probeta con dimensiones de 20 mm de espesor, 40 mm de largo y 20 mm de ancho, para su posterior montaje en resina permitiendo un mejor manejo al momento de pulir. En la figura 2.9, se muestran los cortes realizados a las probetas para su análisis metalográfico.

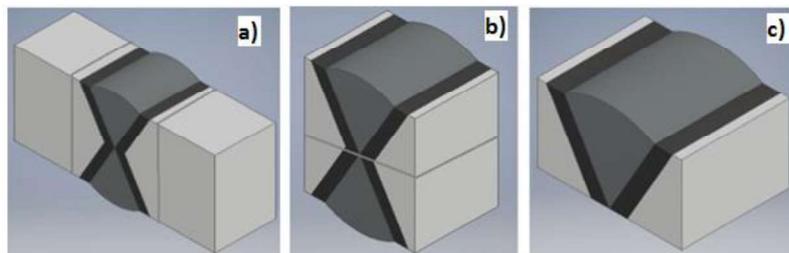


Figura 2.9. Cortes para obtención de probetas para análisis metalográfico. a) Sección a cortar marcada en la probeta b) división del cordón en lados A y B. c) Corte transversal para Análisis metalográfico.
(Fuente: Propia)

2.3.1.2. Equipo metalográfico

Este procedimiento se lo realizó con la ayuda de flexómetros, marcadores metálicos, sierras de mano, lijas de diferentes numeraciones, equipos de desbaste grueso, máquina de mano para lijas para desbaste fino, máquina para pulido y finalmente equipos de microscopia, este análisis se lo realizó en el LMDF. En las Tablas 2.10., 2.11. y 2.12 se muestran los equipos de desbaste grueso, fino y pulido utilizados, además de sus especificaciones técnicas.

Tabla 2.10: Descripción máquina de desbaste grueso.

Equipo	Especificaciones
	<p>Máquina de disco para desbaste grueso Marca: Buehler Voltaje: 115-220 Amperaje: 8.2 A Potencia: 3 HP Refrigerante: Agua Material Abrasivo: 100 granos/pulg²</p>

(Fuente: Propia)

Tabla 2.11: Descripción máquina de desbaste fino.

Equipo	Especificaciones
	<p>Máquina de desbaste fino Marca: Buehler Refrigerante: Agua Material Abrasivo: 240, 320, 400, 600, 1200 granos/pulg²</p>

(Fuente: Propia)

Tabla 2.12: Descripción Pulidora de paño.

Equipo	Especificaciones
	<p>Máquina de pulido Marca: Buehler Voltaje: 115 V Potencia: 3 HP Refrigerante: Agua Material Abrasivo: Alúmina</p>

(Fuente: Propia)

En la Figura 2.10, se observa el reactivo químico, para éste estudio se utilizó el Nital que es una solución de alcohol y ácido nítrico adecuado para el ataque químico de la probeta permitiéndonos y facilitándonos observar la microestructura del metal. En la Tabla 2.13, se muestran los microscopios para macrografías y micrografías respectivamente con su especificación técnica.



Figura 2.10: Reactivo químico Nital al 10%.
(Fuente: Propia)

Tabla 2.13: Descripción microscopio Olympus para macrografías y micrografías.

Equipo	Especificaciones
	<p>Microscopio para macrografías</p> <p>Marca: Olympus SZX7</p> <p>Voltaje: 100-120/230-240 V</p> <p>Amperaje:</p> <p>Frecuencia: 50/60 Hz</p> <p>Objetivos (ZOOM): 0.8X, 1X, 1.25X, 1.6X, 2X, 2.5X, 3.2X, 4X, 5X, 5.6X</p> <p>Iluminación: SI</p>
	<p>Microscopio para micrografías</p> <p>Marca: Olympus GX41F</p> <p>Voltaje: 100-120/230-240 V</p> <p>Amperaje:</p> <p>Frecuencia: 50/60 Hz</p> <p>Objetivos (ZOOM): 5X, 10X, 50X, 100x</p>

(Fuente: Propia)

2.3.1.3. Procedimiento para análisis metalográfico

Corte de probetas: Seleccionar un espécimen de cada tratamiento térmico, con la ayuda de las sierras manuales cortar los especímenes en las medidas mencionadas en la sección 2.3.1.1.

Montaje en resina de probetas: Realizar una mezcla de resina, un catalizador y cobalto, montar la probeta en unos moldes rectangulares para luego verter la mezcla controlando el tiempo de secado. Para finalizar, desmontar la probeta como muestra la Figura 2.11.

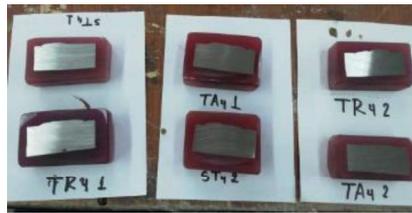


Figura 2.11: Probetas para metalografías, donde: ST (Sin Tratamiento), TA (Tratamiento Térmico de Recocido), TR (Tratamiento térmico para aliviar tensiones residuales).
(Fuente: Propia)

Desbaste grueso: Colocar la probeta con el cordón de soldadura en sentido contrario al giro del disco para el desbaste grueso con un abrasivo de 100 granos/pulg², desbastar quitando excesos de resina y dejando una superficie totalmente plana en el metal.

Desbaste fino: Con la ayuda de lijas de las siguientes denominaciones (240, 320, 400, 600, 1200 granos/pulg²), utilizar consecutivamente de menor a mayor las lijas con el fin de dejar limpia la superficie del metal y de disminuir la profundidad de las rayas que dejó el desbaste grueso.

Pulido: La pulidora de paño es necesaria para este proceso, al igual que en el desbaste grueso colocar el cordón de soldadura en sentido contrario al giro del disco y con la ayuda de la alúmina pulir hasta tener una superficie completamente limpia y brillante sin rastro de líneas que pudo haber dejado el desbaste fino.

Ataque químico: Con reactivos químicos como es el Nital empapar algodón y frotar en la superficie del metal durante unos segundos, seguido lavar con agua y finalmente colocar alcohol con el fin de que no se oxiden las probetas, tener cuidado de no rayar las mismas. Este proceso es necesario para poder visualizar el cordón de soldadura, ZAC, material base y a su vez las microestructuras de los mismos.

Fotografías: Realizado lo anterior, colocar las probetas correctamente en el microscopio de macrografías y micrografías respectivamente, y con el apoyo del software Stream Essentials se toma las fotografías y se procede a archivar.

2.4. Ensayo de dureza

La dureza es una de las propiedades mecánicas más relevantes de los materiales, ésta se define como la resistencia a la deformación plástica localizada. Dentro de los ensayos de dureza se tiene cuatro tipos de ensayos de los cuales se destacan dos:

Dureza Brinell. - Se aplica en la mayoría de metales bajo la norma ASTM E10.

Dureza Rockwell. - Aplica en piezas fundidas y material metálico bajo la norma ASTM E8 y las escalas se realizan en A, B, C, D y F.

Para este trabajo se realiza este ensayo con la finalidad de establecer una comparación de los valores obtenidos antes de iniciar el ensayo de corrosión, tomando en cuenta como referencia el trabajo de titulación (Campos & Jaramillo, 2019), y al final del ensayo de corrosión para interpretar el cambio del comportamiento del material en este aspecto.

2.4.1. Probetas para el ensayo de dureza

Las probetas que se utilizan para este ensayo son las mismas que se seleccionaron al final del ensayo de corrosión, mismas que requieren mantener el paralelismo entre las dos superficies.

2.4.2. Equipo para ensayo de dureza

El ensayo se realiza en el Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla de la Escuela Politécnica Nacional el mismo que cuenta con el equipamiento calibrado y necesario para realizar este tipo de ensayos. En la Tabla 2.14, se muestran las especificaciones técnicas del equipo.

Tabla 2.14. Especificaciones técnicas del equipo de ensayo de dureza.

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

(Fuente: Propia)

2.4.2.1. Procedimiento para ensayo de dureza

Desbastar las superficies de la probeta para garantizar el paralelismo entre las superficies.

Preparar la máquina que se necesita para el ensayo, ubicar el indentador cono de diamante para la dureza necesaria.

(Acero Estructural ASTM A572 usar indentador para escala HR y HCR)

Ubicar la probeta sobre el soporte del durómetro.

Elevar el soporte hasta que la punta del indentador este en contacto con la probeta, para posteriormente 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 encuentre estabilidad.

Descargar la máquina y anotar el valor dado.

Repetir el procedimiento para los diferentes puntos que se hayan establecido, tomando en cuenta los datos a comparar iniciales; mismos que se dan en la zona afectada por el calor (ZAC) y cordón de soldadura, distanciados la misma longitud a lo largo de la superficie de la probeta.

Obtener y tabular todos los resultados.

Se realizaron 15 tomas de durezas en los mismos puntos del trabajo de titulación tomado como referencia como se indica en la Figura 2.12.

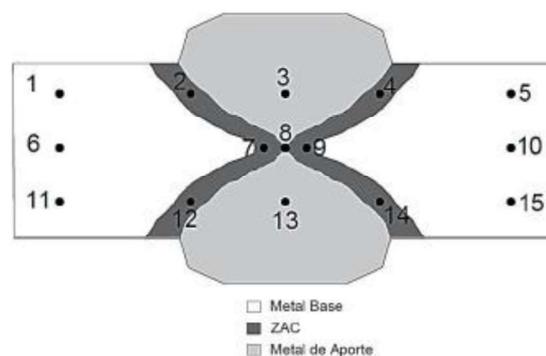


Figura 2.12. Esquema de la toma de durezas.
(Fuente: Campos & Jaramillo, 2019)

Cabe tomar en cuenta que la dureza puede variar en ciertas zonas, para lo cual se cambiará la escala de Rockwell B y Rockwell C, y esto dependerá de la zona a analizar.

Para obtener un valor de referencia, se procede a calcular por medio de la ecuación 2.3 la misma que relaciona la resistencia última a la tracción (S_{ut}) con la dureza (HB) por medio de una constante de proporcionalidad (k_h). (Mikkel, G, 2007) ASTM E140

$$S_{ut} = k_h * HB$$

Ecuación 2.3. Resistencia a la Tracción.
(Fuente: Mikkel, G, 2007)

Despejando HB de la ecuación 2.3. obtenemos:

$$HB = \frac{S_{ut}}{k_h} = \frac{450}{3.45} = 130.44 HB$$

Donde:

k_h : constante de proporcionalidad [3.45]

S_{ut} : resistencia ultima a la tracción [450 MPa]

2.5. Ensayo de microdureza

Este ensayo tiene como finalidad describir el comportamiento de las estructuras cristalinas, para lo cual se realiza indentaciones ya sea sobre granos monofásicos o una fase uniforme; todo aquello mediante una huella superficial en una resolución de micrones.

2.5.1. Probetas para ensayos de microdureza

Las probetas necesarias para este ensayo son las que se empleó en el análisis metalográfico, para lo cual, fue necesario también mantener el paralelismo entre las caras. En la figura 2.12, se especifica las zonas donde se realizó las indentaciones; en éste caso en el cordón de soldadura, enfocándose en el borde por donde ingresó la corrosión.

2.5.2. Equipo utilizado para el ensayo de microdureza

Este ensayo fue desarrollado en el Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla de la Escuela Politécnica Nacional y el equipo empleado se detalla en la Tabla 2.15.

Tabla 2.15: Especificaciones del Micro durómetro.

Imagen	Especificaciones
	Microdurómetro Marca: METKON Modelo: Duroline-M Carga aplicada: 200 [gr] Rango: 10-1000 [gr] Peso: 35 [gr]

(Fuente: Propia)

2.5.3. Procedimiento de ensayo de microdureza

Preparar las superficies de las probetas.

Verificar que el equipo se encuentre a nivel.

Calibrar el durómetro con una carga inicial de 200 [gr] debido a que se toma como referencia el documento (Integridad Superficial y corrosión del Acero Estructural)

Montar la probeta en el equipo, comprobando esta estática.

Iniciar el Software Kameran propio del equipo, que permite visualizar las indentaciones y capturar las imágenes de las mismas.

Realizar varias tomas, para escoger la que indique el mejor enfoque de las zonas.

Trazar diagonales en la geometría del indentador y verificar las medidas.

Mediante el software generar el correspondiente reporte.

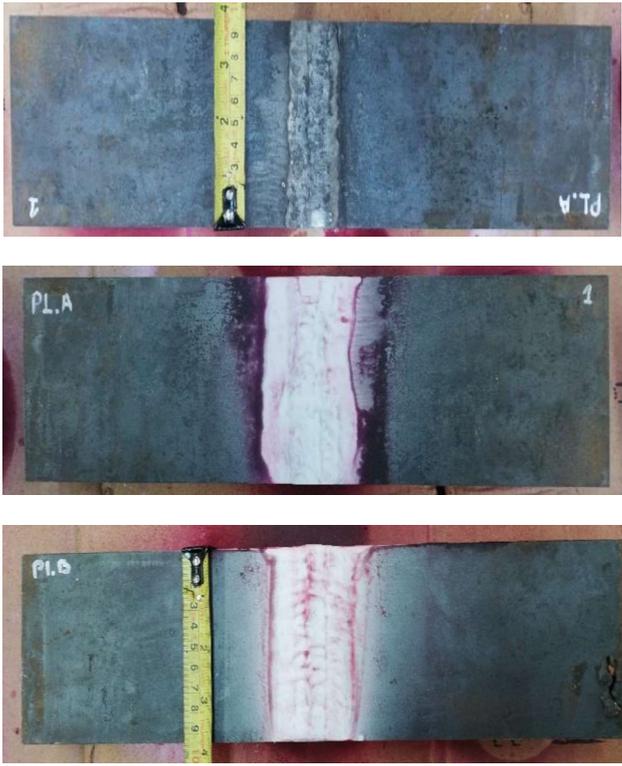
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se detallan los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos no destructivos (END), mecánicos y metalográficos, mediante macrografías, y micrografías, para posteriormente realizar un proceso de comparación y discusión sobre las consecuencias que tendrán sobre las propiedades mecánicas enfocándose en los requerimientos y normas establecidas en los ítems anteriores.

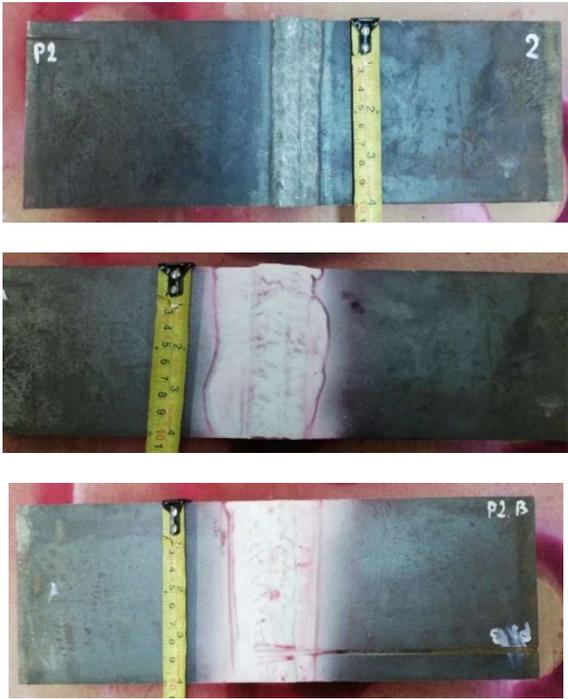
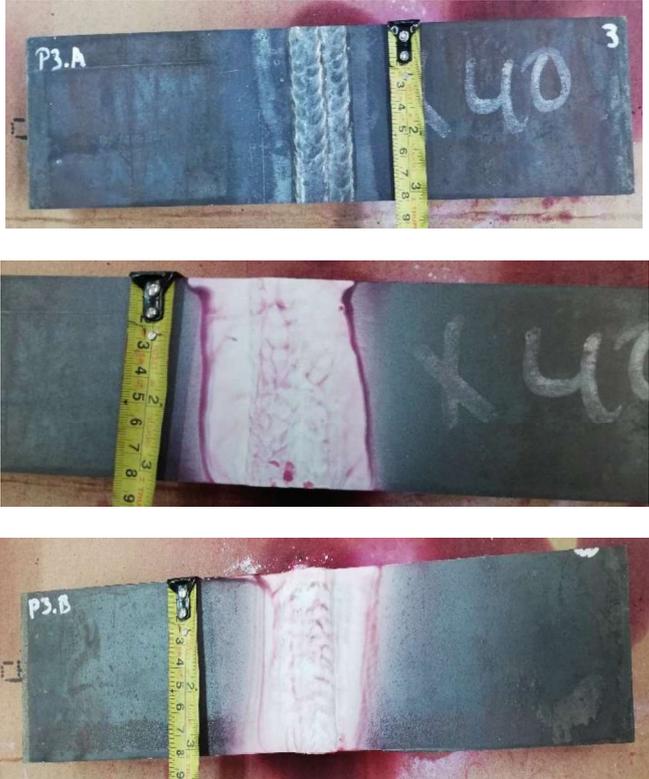
3.1. Resultado de ensayo no destructivo

Los resultados del ensayo no destructivo mediante líquidos penetrantes se pueden observar en los ANEXOS III, a continuación, se comparan

Tabla 3.1: Resultado de ensayo no destructivo mediante líquidos penetrantes.

RESULTADOS		
IDENTIFICACIÓN	IMAGEN	OBSERVACIONES
2019-R9-LP4-P1		No se observan indicaciones en ninguna de las dos superficies.

Continuación tabla 3.1.

<p>2019-R9-LP4-P2</p>		<p>No se observan indicaciones en ninguna de las dos superficies.</p>
<p>2019-R9-LP4-P3</p>		<p>Se observa una indicación de 3 mm de diámetro causada por la acumulación de líquido penetrante en la superficie del cordón de soldadura.</p>

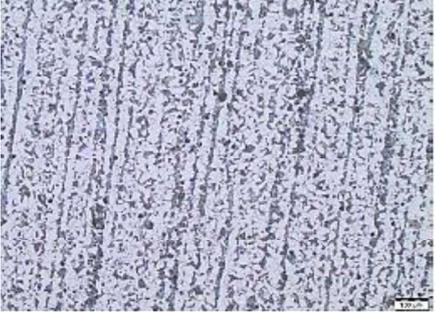
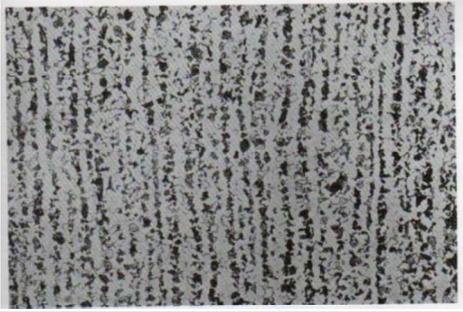
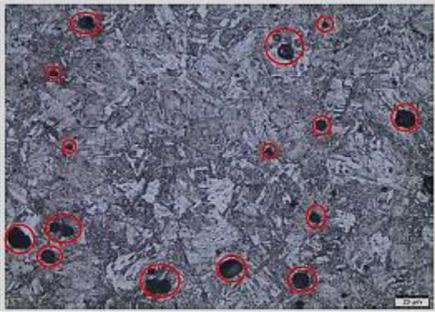
(Fuente. END,2019)

3.2. Ensayo micrográfico

3.2.1. Ensayo micrográfico inicial

En esta sección se mostrarán micrografías que indican las diferentes fases presentes en los especímenes con variaciones de magnificación. Para lo cual, cabe indicar que se tomarán solamente una probeta de cada grupo de tratamiento térmico, a las cuales las denominamos de la siguiente manera: Probeta sin tratamiento térmico (ST) Tabla 3.2 y Figura 3.1, probeta realizada un tratamiento térmico para aliviar tensiones residuales (TR) Tabla 3.3 y Figura 3.2 y probeta realizada recocido (TA) representada en la Tabla 3.4 y Figura 3.3.

Tabla 3.2: Micrografías iniciales de la probeta sin tratamiento térmico (ST).

Imagen	Referencia
	
<p>Material base, con ataque químico. Se presentan la ferrita y perlita alineadas conforme a la dirección del laminado en caliente terminado en frío. Magnificación: 100x</p>	<p>Acero laminado con una textura alineada. La ferrita y la perlita están dispuestas en estrías continuas. (Colpaert, 2005)</p>
	
<p>Zona afectada por el calor con ataque químico. Presencia de ferrita equiaxial y perlita, además de muchas inclusiones metálicas. Magnificación: 500x</p>	<p>Acero bajo carbono muestra ferrita equiaxial y perlita. (Colpaert, 2005)</p>

(Fuente: LMDF, 2019)

A continuación, se indicarán imágenes que utilizarán el término zona de fusión parcial (ZPF) la misma que corresponde al borde donde comienzan los granos columnares hasta la zona donde se funden los granos de metal base.

En la Figura 3.1, se observa la distribución de las diferentes zonas: zona afectada por el calor (ZAC), zona de fusión parcial (ZPF) y cordón de soldadura (CS).

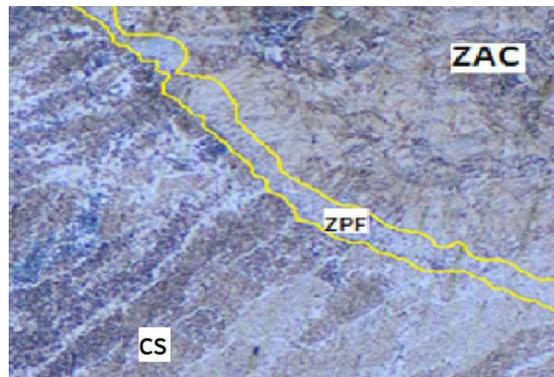


Figura 3.1. Micrografías de la distribución de las zonas: zona afectada por el calor(ZAC), zona de fusión parcial (ZPF) y cordón de soldadura (CS), con un aumento de 50X.
(Fuente: LMDf, 2019)

Tabla 3.3: Metalografías iniciales a las zonas de la probeta tratamiento recocido (TA).

Imagen	Observaciones
	
<p>Material Base, con ataque químico. Se presentan la ferrita y perlita ordenadas conforme a la dirección del laminado caliente terminado en frío. Magnificación 100x</p>	<p>Acero laminado con una textura alineada. La ferrita y la perlita están dispuestas en estrías continuas.</p>
	
<p>Zona afectada por el calor con ataque químico. Se observa la disposición triangular de agujas de ferrita, perlita cementita, además de algunas inclusiones. Magnificación 500x</p>	<p>Textura Acicular, la perlita que se forma entre las agujas de ferrita también tiene una apariencia acicular.</p>

(Fuente: LMDf, 2019)

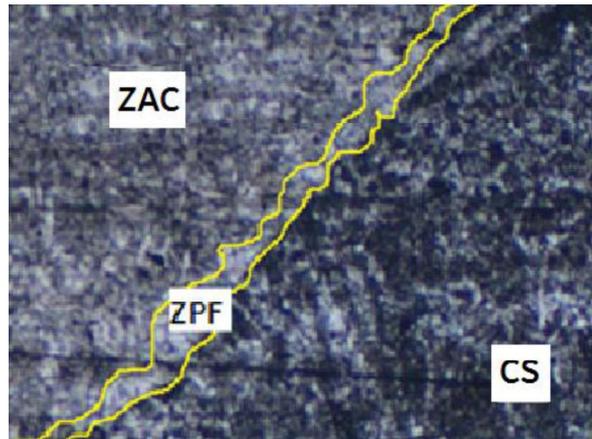
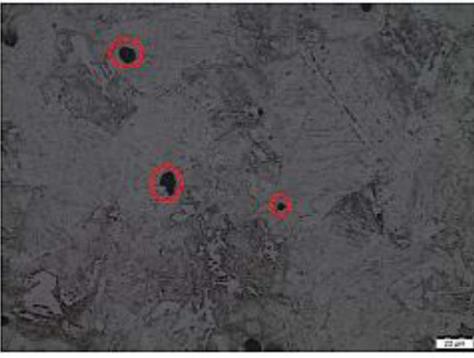
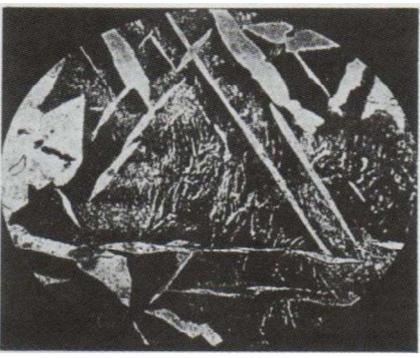


Figura 3.2: Micrografía de la distribución de las zonas: zona afectada por el calor (ZAC), zona de fusión parcial (ZPF) y cordón de soldadura (CS), con un aumento de 50X.

(Fuente: LMDf, 2019)

Tabla 3.4. Micrografía inicial a las zonas de la probeta con tratamiento térmico para aliviar tensiones residuales (TR).

Imagen	Observaciones
	
<p>Material Base, con ataque químico. Presencia de ferrita y perlita dispuesta en dirección al laminado en caliente terminado en frío. Magnificación: 100X</p>	<p>Acero laminado con una textura alineada. La ferrita y la perlita están dispuestas en estrías continuas. (Colpaert, 2005)</p>
	
<p>Zona afectada por el calor con ataque químico. Disposición triangular de agujas de ferrita, perlita y cementita además de algunas inclusiones metálicas. Magnificación 500x</p>	<p>Acero con textura acicular o entre Widmanstätten. En este caso se observa la disposición triangular de las agujas de ferrita. (Colpaert, 2005)</p>

(Fuente: LMDf, 2019)

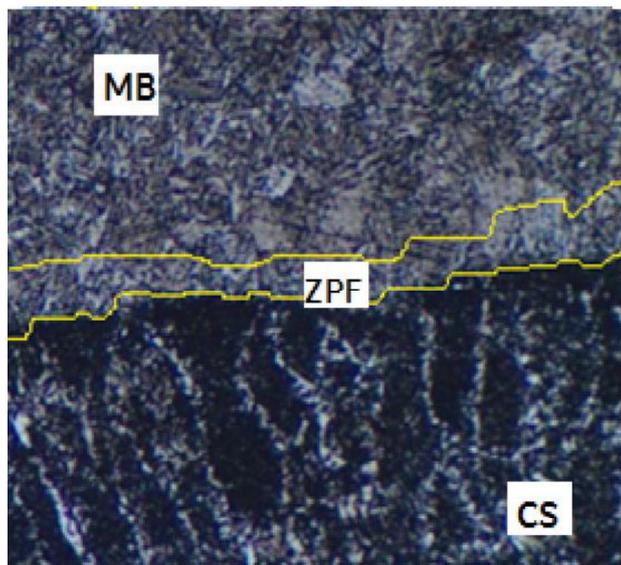


Figura 3.3: Micrografía de la distribución de las zonas: zona afectada por el calor (ZAC), zona de fusión parcial (ZPF) y cordón de soldadura (CS), con un aumento de 50X.
(Fuente: LMDF, 2019)

3.2.1.1. Resultado del ensayo macrográfico de la probeta (ST)

En la figura 3.4, se muestra la macrografía para la probeta sin tratamiento térmico ST, la cual indica el tamaño de la zona afectada por el calor (ZAC) con un promedio de 3,57 [mm]; también se observa los pases y diseño de la junta de soldadura.

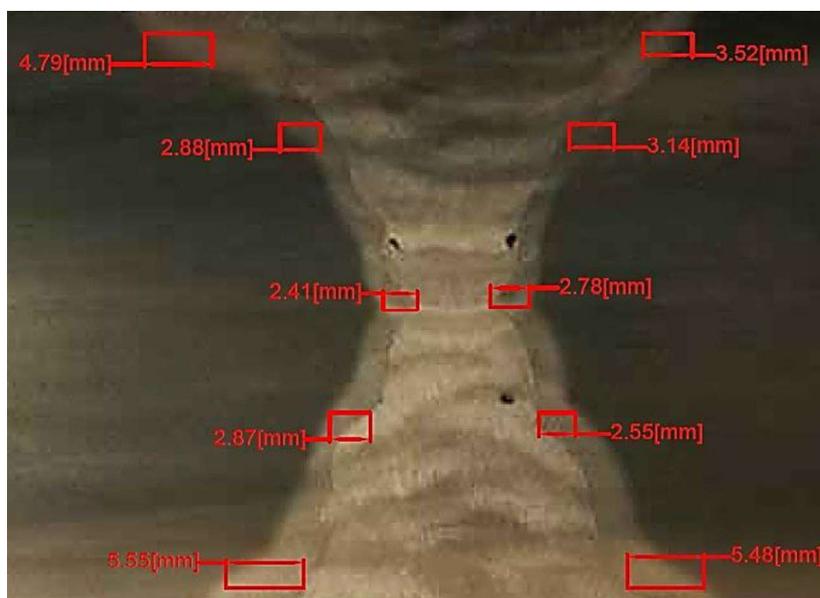


Figura 3.4: Macrografía probeta sin tratamiento térmico (ST) (Magnificación 0,4X).
(Fuente: LMDF, 2019)

3.2.1.2. Resultado del ensayo macrográfico de la probeta (TA)

En la figura 3.5, se muestra la macrografía para la probeta con recocido TA, la cual indica el tamaño de la zona afectada por el calor (ZAC) con un promedio de 3,66 [mm]; se observa los pases y diseño de la junta de soldadura.

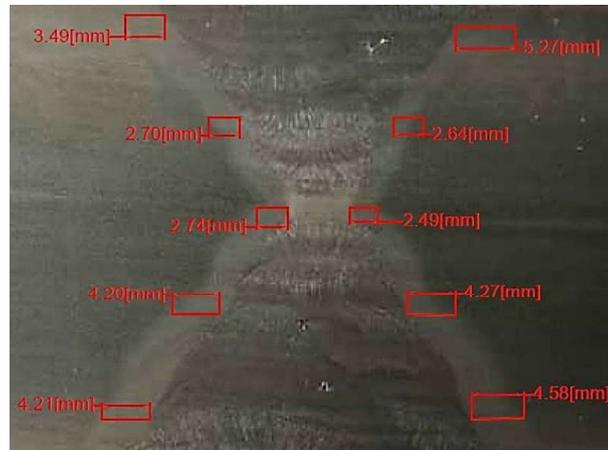


Figura 3.5. Macrografía probeta con tratamiento térmico recocido (TA) (Magnificación 0,4X).
(Fuente: LMDF, 2019)

3.2.1.3. Resultado del ensayo macrográfico de la probeta (TR).

En la figura 3.6, se muestra la macrografía para la probeta con tratamiento térmico para aliviar tensiones residuales, la cual indica el tamaño de la zona afectada por el calor (ZAC) con un promedio de 4,05 [mm]; se observa los pases y diseño de la junta, se evidencia que en este cordón existe una discontinuidad por falta de fusión en el cordón.

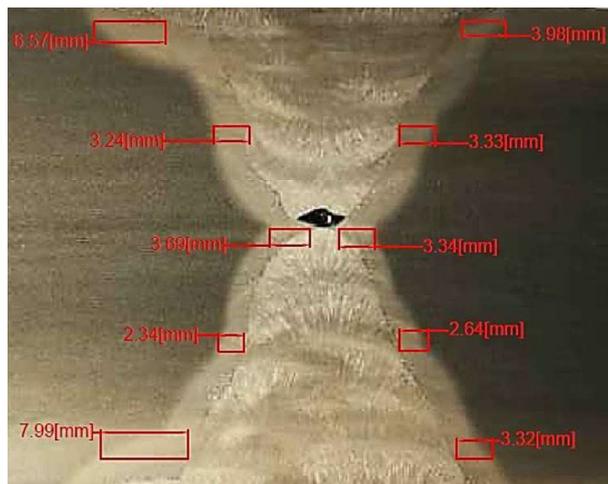


Figura 3.6: Macrografía probeta con tratamiento térmico para aliviar tensiones residuales (TR)
(Magnificación 0,4X).
(Fuente: LMDF, 2019)

3.3. Resultados del ensayo de corrosión

3.3.1. Pérdida de masa

Durante los tiempos establecidos se extraen las muestras de las cámaras para verificar la variación de masa, la cual está tabulada y agrupada según el tratamiento térmico post soldadura aplicado, los valores se presentan en las Tablas, 3.5., 3.6. y 3.7.

Tabla 3.5. Resultados de la variación de masa en las probetas sin tratamiento térmico (ST), expuestas 18 días.

LADO A	Probeta	ST1	ST2	ST3	ST4
	Masa [gr]				
	INICIO	665,90	647,20	645,30	649,40
	3 días	662,20	643,40	641,70	646,10
	6 días	659,80	641,00	639,20	643,20
	9 días	657,20	638,30	636,50	640,70
	Δ_{masa}	8,70	8,90	8,80	8,70
	Desviación estandar	3,70	3,78	3,74	3,75
LADO B	Probeta	ST1	ST2	ST3	ST4
	Masa [gr]				
	INICIO	657,20	638,30	636,50	640,70
	3 días	653,80	634,50	633,00	637,10
	6 días	651,50	632,20	630,90	634,90
	9 días	648,90	629,60	628,20	632,40
	Δ_{masa}	8,30	8,7	8,3	8,3
	Desviación estandar	3,52	3,69	3,50	3,52

(Fuente: Propia)

Durante los 18 días exposición de las probetas del grupo sin ningún tratamiento (ST) se obtiene como pérdida de masa promedio 8.58 [gr] con una desviación estándar de 10,20 [gr], siendo la probeta ST2 la que presenta mayor variación de su masa dando valores de 8.9 [gr] para el lado A y 8.7 [gr] para el lado B.

Tabla 3.6: Resultados de la variación de masa en las probetas con recocido (TA), expuestas 18 días.

LADO A	Probeta	TA1	TA2	TA3	TA4
	Masa [gr]				
	INICIO	583,00	622,80	618,40	636,50
	3 días	580,10	620,80	616,10	634,00
	6 días	577,40	618,00	613,40	631,30
	9 días	574,30	615,00	610,30	628,50
	Δ_{masa}	8,7	7,8	8,1	8
	Desviación estandar	3,72	3,40	3,49	3,45
LADO B	Probeta	TA1	TA2	TA3	TA4
	Masa [gr]				
	INICIO	574,30	615,00	610,30	628,50
	3 días	571,30	612,10	607,10	624,60
	6 días	568,50	609,00	604,40	623,30
	9 días	565,80	606,40	600,90	620,00
	Δ_{masa}	8,5	8,6	9,4	8,5
	Desviación estandar	3,65	3,73	3,99	3,51

(Fuente: Propia)

Para las probetas que fueron aplicadas el tratamiento térmico de recocido TA la pérdida de masa promedio es de 8.45 [gr] con una desviación estándar de 21,13 [gr], siendo la probeta TA1 la de mayor pérdida de masa en el lado A con 8,7 [gr], y para el lado B la probeta TA3 con 9,4 [gr] de pérdida de masa.

Tabla 3.7. Resultados de la variación de masa en las probetas con tratamiento térmico para aliviar tensiones residuales (TR), expuestas 18 días.

LADO A	Probeta	TR1	TR2	TR3	TR4
	Masa [gr]				
	INICIO	718,20	645,90	646,00	648,50
	3 días	715,20	643,40	643,20	645,70
	6 días	712,80	640,70	640,60	643,20
	9 días	709,70	637,70	637,60	639,70
	Δ_{masa}	8,5	8,2	8,4	8,8
	Desviación estandar	3,61	3,53	3,59	3,74
LADO B	Probeta	TR1	TR2	TR3	TR4
	Masa [gr]				
	INICIO	709,70	637,70	637,60	639,70
	3 días	707,10	634,80	634,30	636,30
	6 días	704,70	631,70	631,10	633,40
	9 días	701,40	629,00	629,00	630,30
	Δ_{masa}	8,3	8,7	8,6	9,4
	Desviación estandar	3,53	3,77	3,76	4,02

(Fuente: Propia)

Y para el caso del último grupo, que fue aplicado el tratamiento térmico para aliviar tensiones residuales, existe una variación de masa promedio de 8.61 [gr] con una desviación estándar de 32,17 [gr], la probeta TR4 presenta mayor pérdida de masa para los dos lados siendo 8.4 [gr] y 9.4 [gr] respectivamente.

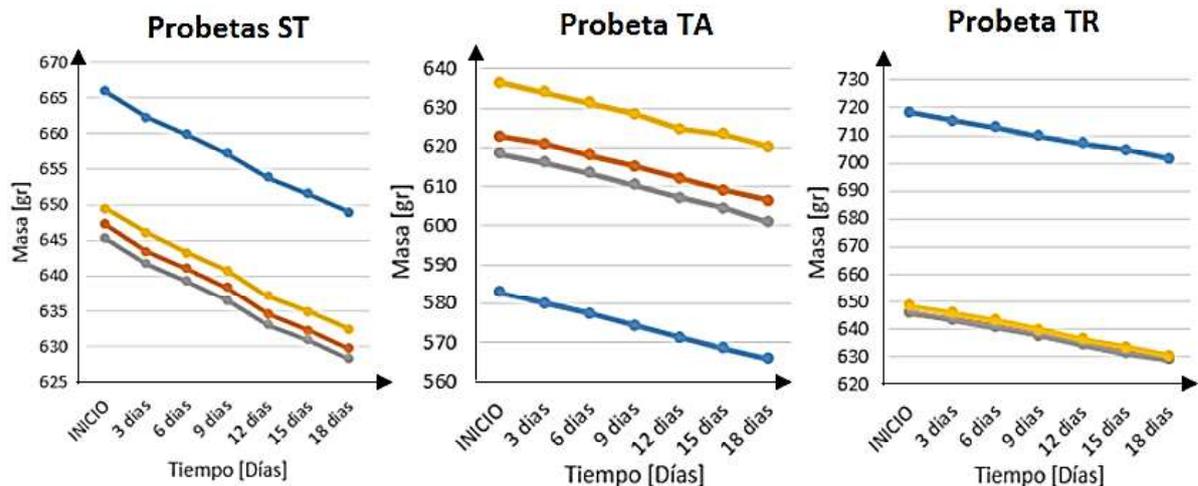


Figura 3.7: Variación de masa cada grupo de probetas.
(Fuente: Propia)

3.3.2. Velocidad de corrosión

La velocidad de corrosión en todas las probetas ensayadas a partir de los datos de pérdida de masa y empleando la fórmula dada en la norma ASTM G1-03, se expresa en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8. Velocidad de corrosión para todas las probetas durante 432 [horas].

Probeta	Masa Inicial [gr]	Masa Final [gr]	Vel. De Corrosión [m/año]	Desviación Estándar [m/año]
ST1	665,9	648,9	0,194	0,18
ST2	647,20	629,6	0,201	0,19
ST3	645,3	628,2	0,195	0,18
ST4	649,4	632,4	0,194	0,18
TA1	583	565,8	0,197	0,18
TA2	622,80	606,4	0,187	0,18
TA3	618,4	600,9	0,200	0,19
TA4	636,5	620	0,189	0,19
TR1	718,2	701,4	0,192	0,18
TR2	645,90	629	0,193	0,18
TR3	646	629	0,194	0,18
TR4	648,5	630,3	0,208	0,19

(Fuente: Propia)

En la Figura 3.8, se muestra la tasa de velocidad para cada uno de los grupos de tratamientos térmicos.

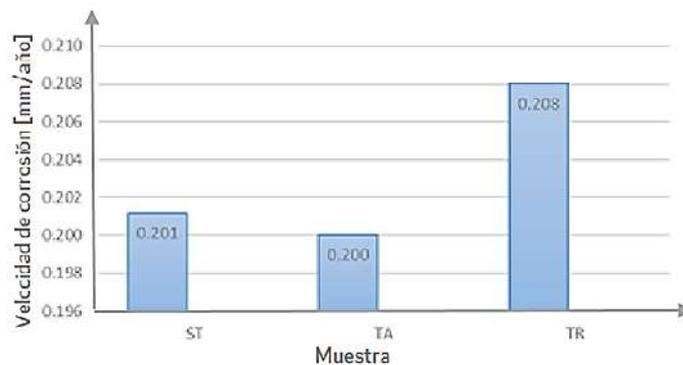


Figura 3.8: Comparación entre grupos de muestras para la velocidad de corrosión. (Fuente: Propia)

3.3.3. Macrografías

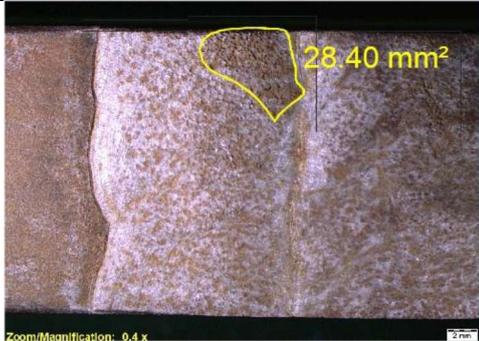
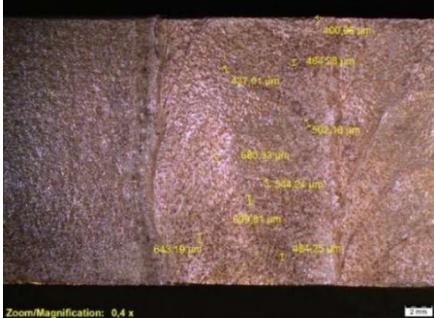
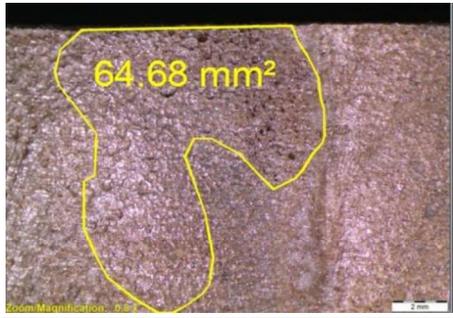
Las macrografías se tomaron cada 3 días para observar la corrosión que se presenta en la superficie de la probeta sumergida. Estas macrografías fueron tomadas en el microscopio estéreo, siguiendo un pequeño proceso especificado a continuación:

- La probeta es removida de la cámara que contiene el químico para luego proceder a lavar con agua, jabón neutro (pH=0), y un cepillo de cerdas suaves.

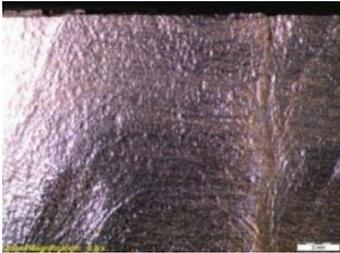
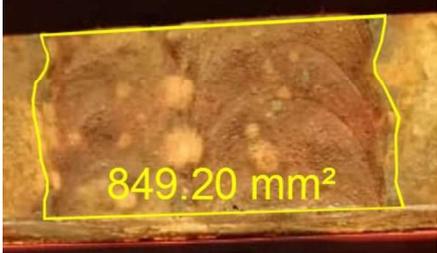
- Para poder tomar las macrografías es necesario colocar alcohol a las probetas y secarlas.
- En el microscopio observamos cada zona de la probeta (MB, ZAC, MA) y tomamos fotos de las zonas más críticas.

En las tablas 3.9., 3.10., 3.11., 3.12., 3.13., y 3.14., 3.15., 3.16., 3.17., se presenta las macrografías de la superficie de las probetas expuestas y los valores del área de corrosión de las mismas.

Tabla 3.9. Macrografías de las probetas ST lado A, para 3, 6 ,9 días de inmersión en la solución de cloruro férrico.

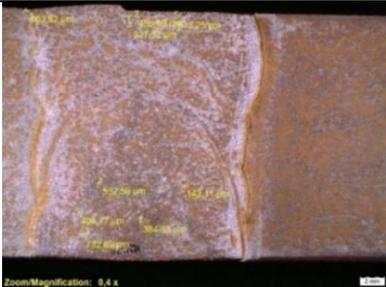
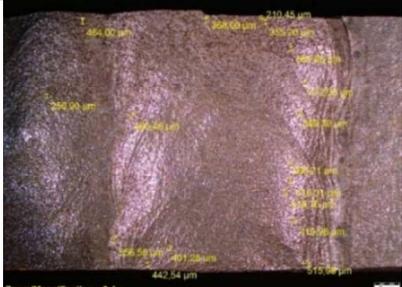
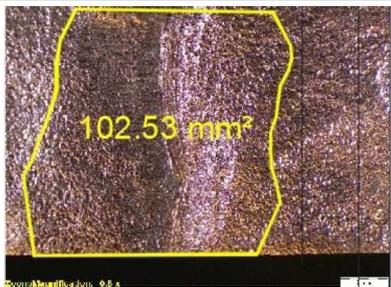
TIEMPO	PICADURA	CORROSION	
3 Dias			
	Presencia de algunas picaduras, de forma circular y ovaladas, y manchas de color café (óxido de hierro).		
	Promedio picadura	415,24 [µm]	Área promedio
6 Dias			
	Presencia de varias picaduras, el número aumento en comparación a la anterior, picaduras con forma circular y ovaladas, también hay presencia manchas de color café (óxido de hierro).		
	Promedio picadura	419,05 [µm]	Área promedio

Continuación 3.9.

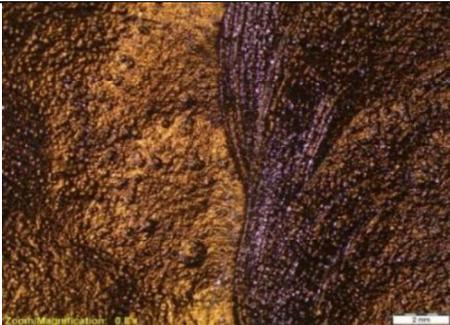
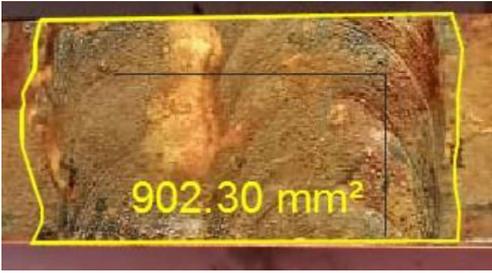
9 Días				
	<p>Presencia de picaduras en todo el cordón de la probeta, el número aumento en comparación al anterior, no existe un promedio del tamaño de la picadura ya que todas se unieron y se dificulta la medición de las mismas, algunas picaduras con forma circular, también hay presencia manchas de color café (óxido de hierro)</p>		<p>Área de corrosión para los 9 días de inmersión, el área afectada se distribuye a lo largo de todo el cordón y ZAC, presencia de picaduras y manchas color marrón.</p>	
	Promedio picadura	-	Área promedio	849,20 [mm ²]

(Fuente: Propia)

Tabla 3.10: Macrografías de las probetas ST lado B, para 3, 6 ,9 días de inmersión en la solución de cloruro férrico.

TIEMPO	PICADURA		CORROSION	
3 Días				
	<p>Presencia de algunas picaduras de forma circular y ovaladas, manchas de color café (óxido de hierro).</p>		<p>Área de corrosión para los 3 primeros días de inmersión, presencia de picaduras.</p>	
	Promedio picadura	265,54 [µm]	Área picadura	87,27 [mm ²]
6 Días				
	<p>Presencia de varias picaduras, el número aumento en comparación a los 3 primeros días, picaduras con forma circular y ovalada, también hay presencia de manchas de color café (óxido de hierro).</p>		<p>Área de corrosión para los 6 días de inmersión, el área aumenta, presencia de picaduras y manchas color marrón.</p>	
	Promedio picadura	426,50 [µm]	Área picadura	104,60 [mm ²]

Continuación tabla 3.10.

9 Días				
	Presencia de picaduras en todo el cordón de la probeta, el número aumento en comparación al anterior, no existe un promedio del tamaño de la picadura ya que todas se unieron y dificulta su medición, algunas picaduras con forma circular y ovaladas, también hay presencia manchas de color café (óxido de hierro)	Área de corrosión para los 9 días de inmersión, el área afectada se distribuye a lo largo de todo el cordón y ZAC, presencia de picaduras y manchas color marrón.		
	Promedio picadura	-	Área picadura	902,30 [mm ²]

(Fuente: Propia)

Mediante las Tablas 3.9 y 3.10 correspondientes al grupo sin tratamiento (ST), se evidencia que a las 72 horas de inmersión se forman las primeras picaduras en su mayor parte en los extremos del cordón de soldadura resultando un promedio de 31 por probeta; para las 144 horas, las picaduras antes formadas se tornan más grandes y sus geometrías circulares se unen con otras dando lugar a 40 picaduras promedio, incrementando en 1.29%, y para 216 horas las picaduras son demasiado extendidas dificultando el conteo y medición de las mismas debido a sus geometrías amorfas

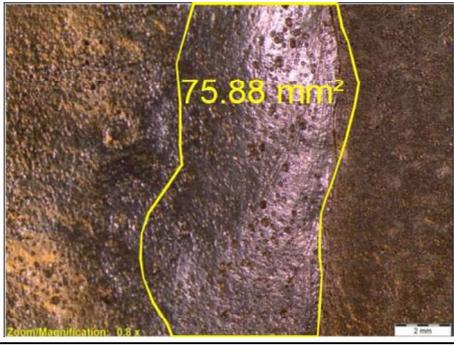
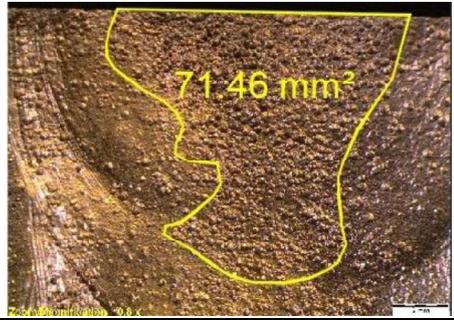
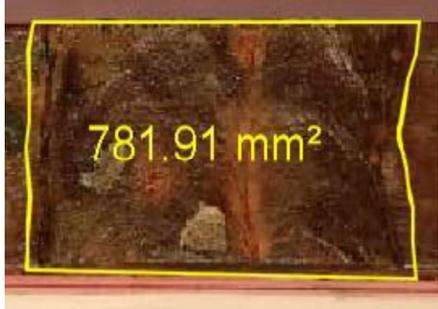
Tabla 3.11. Tamaño promedio de las picaduras en la probeta ST en los dos lados.

Probeta ST				
Lado A	Tiempo (días)	3	6	9
	Área corrosión (mm ²)	16,74	63,54	849,20
	Tamaño promedio picadura (µm)	415,24	419,05	NA
	Desviación estándar	179,46	117,68	NA
Lado B	Tiempo (días)	3	6	9
	Área corrosión (mm ²)	87,27	104,6	902,30
	Tamaño promedio picadura (µm)	265,54	426,50	NA
	Desviación estándar	105,92	81,64	NA

(Fuente: Propia)

Para las probetas ST (Tabla 3.11.), la picadura crece aproximadamente 1.2 veces su tamaño inicial cuando transcurren 144 horas, pero a las 216 horas siguientes su crecimiento aumenta a tal punto de dificultar la medición de las mismas debido a la geometría que presentan.

Tabla 3.13: Macrografías de las probetas TA lado B, para 3, 6 ,9 días de inmersión en la solución de cloruro férrico.

TIEMPO	PICADURA	CORROSION	
3 Dias			
	Presencia de algunas picaduras con forma circular y ovaladas, manchas de color café (óxido de hierro).		
	Promedio picadura	392,66 [µm]	Área picadura
6 Dias			
	Presencia de varias picaduras, el número aumento en comparación a los 3 primeros días, picaduras con forma circular y ovaladas, también hay presencia de manchas de color café (óxido de hierro).		
	Promedio picadura	434,49 [µm]	Área picadura
9 Dias			
	Presencia de picaduras en todo el cordón de la probeta, el número aumento en comparación al anterior, no existe un promedio del tamaño de la picadura ya que todas se unieron y dificulta su medición, algunas picaduras con forma circular y ovaladas, también hay presencia manchas de color café (óxido de hierro)		
	Promedio picadura	-	Área promedio

(Fuente: Propia)

En las Tablas 3.12 y 3.13. se exponen macrográficas del grupo de recocido (TA); a las 72 horas se poseen 22 picaduras promedio, las cuales empiezan en el extremo lateral del cordón de soldadura, a las 144 horas se contabiliza 28 picaduras promedio, pero de gran magnitud que se agrupan y alcanzan la zona central del material de aporte, presentando un incremento del 1.27%, para el caso de las 216 horas la corrosión se tornó tipo uniforme.

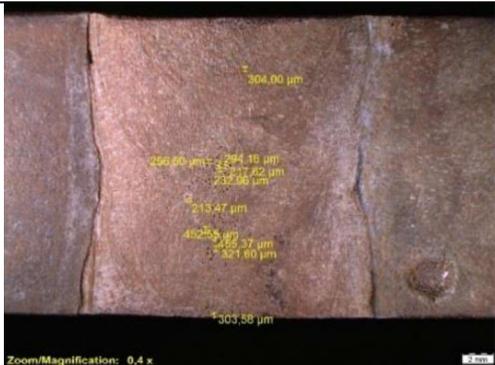
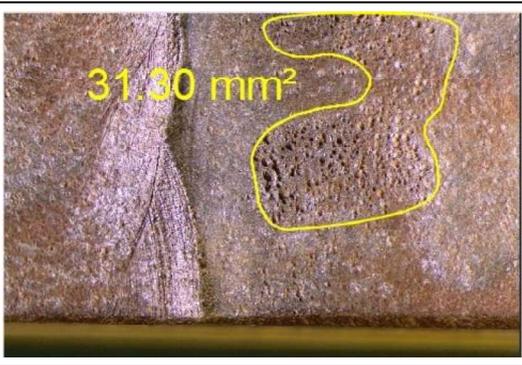
Tabla 3.14. Tamaño promedio de las picaduras en la probeta TA, en los dos lados.

Probeta TA				
Lado A	Tiempo (días)	3	6	9
	Área corrosión (mm ²)	39,07	66,56	875,71
	Tamaño promedio picadura (µm)	437,93	439,59	NA
	Desviación estándar	179,14	150,32	NA
Lado B	Tiempo (días)	3	6	9
	Área corrosión (mm ²)	77,93	98,8	781,91
	Tamaño promedio picadura (µm)	392,66	434,49	NA
	Desviación estándar	75,55	85,80	NA

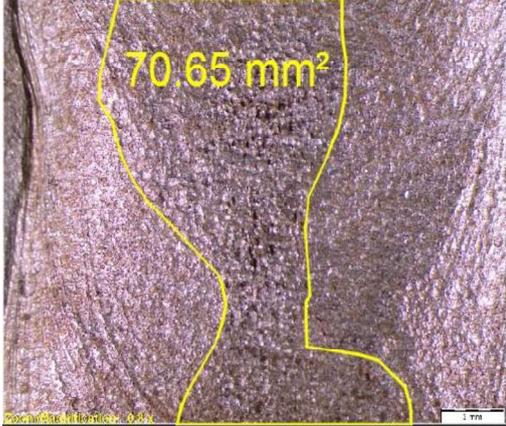
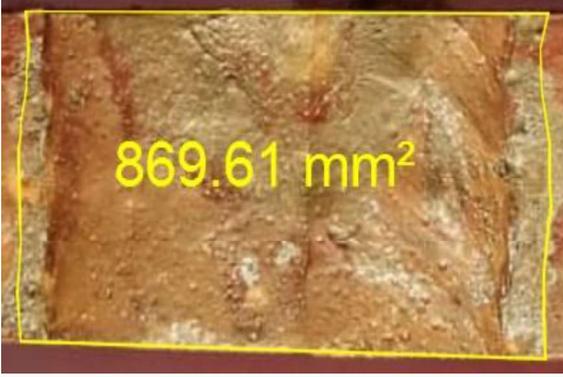
(Fuente: Propia)

Para las probetas TA (Tabla 3.14.), el tamaño promedio de la picadura progresa alrededor de 1.1 veces el tamaño inicial al transcurrir las 144 horas iniciales y en los días posteriores las picaduras se unen y expanden a lo largo y ancho del cordón de soldadura y la zona afectada por el calor.

Tabla 3.15: Macrográficas de las probetas TR lado A, para 3, 6 ,9 días de inmersión en la solución de cloruro férrico.

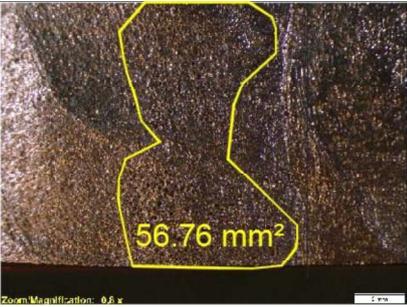
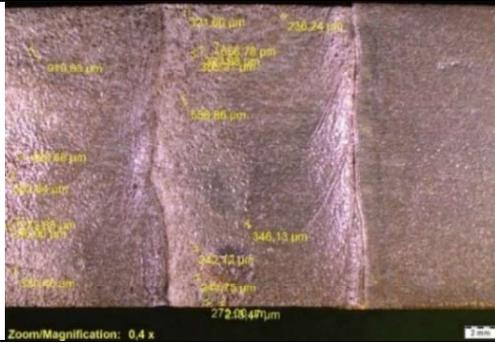
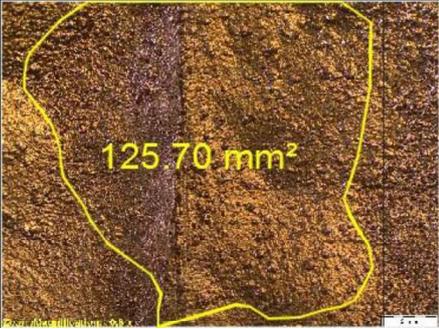
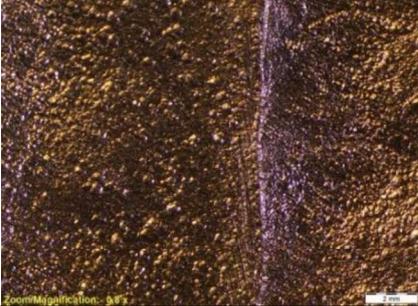
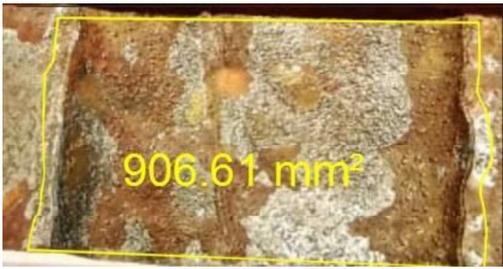
TIEMPO	PICADURA	CORROSION		
3 Dias				
	Presencia de algunas picaduras con forma circular y ovalada, manchas de color café (óxido de hierro).	Área de corrosión para los 3 primeros días de inmersión, presencia de picaduras y manchas color marrón.		
	Promedio picadura	339,49 [µm]	Área picadura	25,82 [mm ²]

Continuación tabla 3.15.

6 Días				
	<p>Presencia de más picaduras, el número aumento en comparación al anterior, picaduras con forma circular, también hay presencia manchas de color café (óxido de hierro).</p>		<p>Área de corrosión para los 6 días de inmersión, el área aumento, presencia de picaduras y manchas color marrón.</p>	
Promedio picadura		431,34 [µm]	Área picadura	48,19 [mm ²]
9 Días				
	<p>Presencia de picaduras en todo el cordón de la probeta, el número aumento en comparación al anterior, no existe un promedio del tamaño de la picadura ya que todas se unieron y se dificulta la medición de las mismas, algunas picaduras con forma circular, también hay presencia manchas de color café (óxido de hierro)</p>		<p>Área de corrosión para los 9 días de inmersión, el área afectada se distribuye a lo largo de todo el cordón y ZAC, presencia de picaduras y manchas color marrón.</p>	
Promedio picadura		-	Área picadura	869,61 [mm ²]

(Fuente: Propia)

Tabla 3.16: Macrográficas de las probetas TR lado B, para 3, 6, 9 días de inmersión en la solución de cloruro férrico.

TIEMPO	PICADURA	CORROSION
3 Dias		
	<p>Presencia de algunas picaduras con forma circular y ovaladas, manchas de color café (óxido de hierro).</p> <p>Promedio picadura 381,97 [µm]</p>	<p>Área de corrosión para los 3 primeros días de inmersión, presencia de picaduras y manchas color marrón.</p> <p>Área picadura 56,19 [mm²]</p>
6 Dias		
	<p>Presencia de más picaduras, el número aumento en comparación a los 3 primeros días, picaduras con forma circular y ovaladas, también hay presencia de manchas de color café (óxido de hierro).</p> <p>Promedio picadura 486,72 [µm]</p>	<p>Área de corrosión para los 6 días de inmersión, el área aumento, presencia de picaduras.</p> <p>Área picadura 116,19 [mm²]</p>
9 Dias		
	<p>Presencia de picaduras en todo el cordón de la probeta, el número aumento en comparación al anterior, no existe un promedio del tamaño de la picadura ya que todas se unieron y dificulta su medición, algunas picaduras con forma circular y ovaladas, también hay presencia manchas de color café (óxido de hierro)</p> <p>Promedio picadura -</p>	<p>Área de corrosión para los 9 días de inmersión, el área afectada se distribuye a lo largo de todo el cordón y ZAC, presencia de picaduras y manchas color marrón.</p> <p>Área promedio 906,61 [mm²]</p>

(Fuente: Propia)

En las Tablas 3.15 y 3.16 indican las macrografías para el grupo de tratamiento térmico para aliviar tensiones residuales (TR), formándose 26 picaduras a las 72 horas, que se generan tanto a los extremos como en la zona central del cordón, a las 144 horas se crearon 35 picaduras incrementando 1.35% y a las 216 horas estas picaduras se dilatan a lo largo de toda el área de cordón.

Tabla 3.17. Tamaño promedio de las picaduras en la probeta TR, en los dos lados.

Probeta TR				
Lado A	Tiempo (días)	3	6	9
	Área corrosión (mm^2)	25,82	48,19	869,61
	Tamaño promedio picadura (μm)	339,49	431,34	NA
	Desviación estándar	195,52	188,76	NA
Lado B	Tiempo (días)	3	6	9
	Área corrosión (mm^2)	56,19	116,19	906,61
	Tamaño promedio picadura (μm)	381,97	486,72	NA
	Desviación estándar	81,11	115,20	NA

(Fuente: Propia)

Para las probetas TR (Tabla 3.17.) el tamaño promedio de las picaduras incrementa 1.5 veces su tamaño inicial cuando permanecieron sumergidas 144 horas, pero para el próximo intervalo de inmersión las picaduras se dilatan hasta unirse entre ellas cubriendo toda el área del metal de aporte y la ZAC.

En la Figura 3.9. se muestra el incremento del número de picaduras en función de los intervalos de inspección realizadas durante el ensayo de corrosión a las probetas de los diferentes grupos de tratamientos térmicos: sin tratamiento (ST), recocido (TA), y tratamiento térmico para aliviar tensiones residuales (TR).

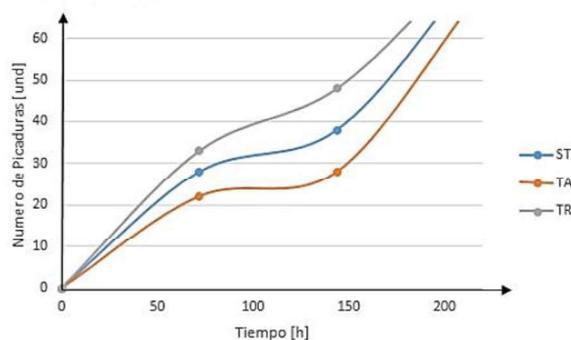


Figura 3.9: Número de picaduras en función del tiempo.
(Fuente: Propia)

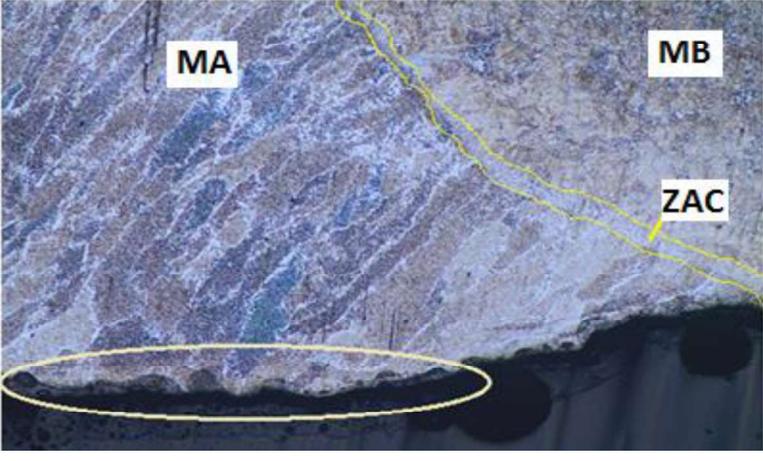
Por lo expuesto en este análisis se puede comprobar que el grupo TR tiene mayor afectación ante la corrosión debido a que es el mayor tamaño de picaduras presentó.

3.3.4. Metalografía

Mediante las metalografías se puede estudiar las características microestructurales del acero A572, mismas que se relacionan con las propiedades químicas y mecánicas de éste acero estructural, además de permitir percibir la afectación de la corrosión a dichas propiedades, y detectar discontinuidades o desprendimientos de material presentes en las muestras.

En las Tablas de la 3.18 a 3.23., se muestran cada uno de los cortes a las probetas seleccionadas para el análisis, mismas que fueron montadas en resina para la correcta manipulación de los especímenes y realizar algunas tomas en puntos de mayor afectación.

Tabla 3.18: Metalografía corte transversal probeta ST lado A.

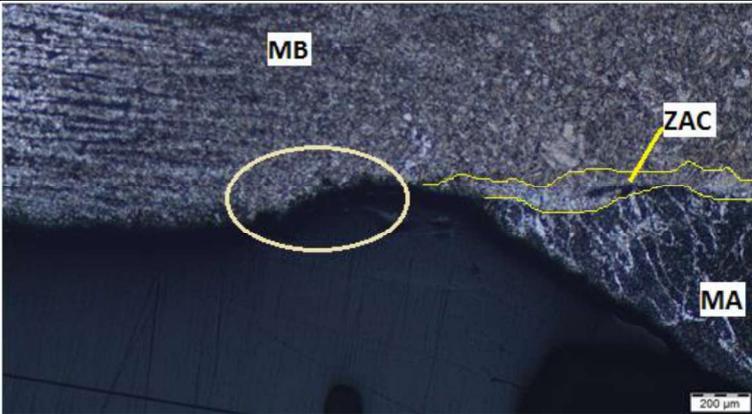
Toma 1	
Metalografía de la probeta ST lado A, se identifica la zona afectada por el calor y el material de aporte, desprendimiento de material por el proceso de corrosión por picadura. Aumento 5X.	
Toma 2	
Metalografía en el cordón de soldadura, se puede observar el desprendimiento del material en el borde por causa de la corrosión por picadura. Aumento 10X	

Continuación 3.18.

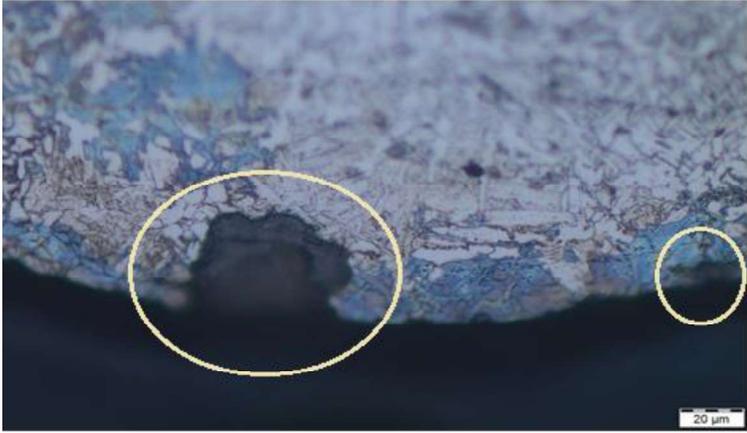
Toma 3	
<p>Metalografía con un aumento de 50X en los puntos más demostrativos de la existencia del avance de la corrosión por picadura y por ende desprendimiento de material a través del límite de grano.</p>	

(Fuente: Propia)

Tabla 3.19. Metalografía corte transversal probeta ST lado B.

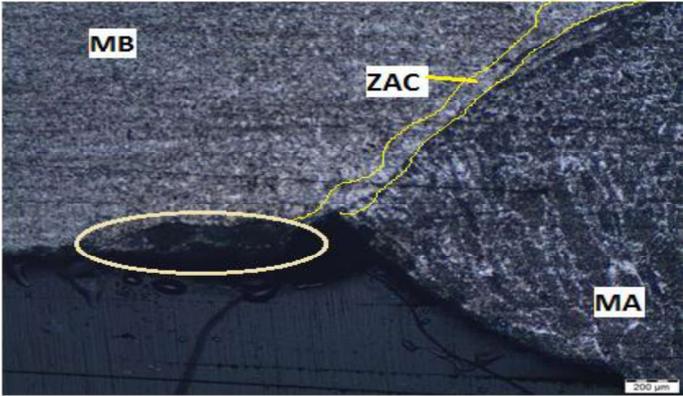
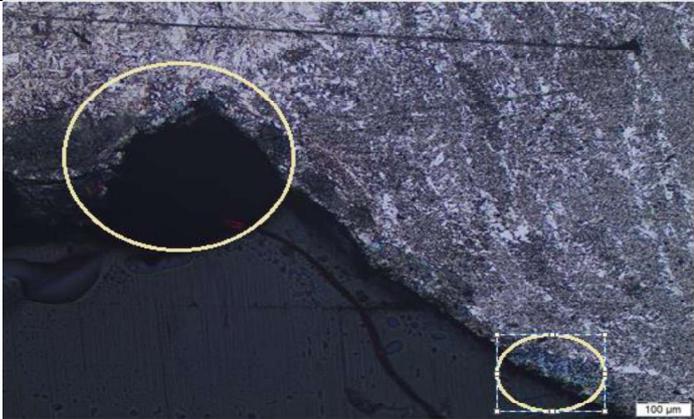
Toma 1	
<p>Metalografía correspondiente a la probeta ST lado B en la cual se identifican la ZAC y el material de aporte además de mostrar el desprendimiento de material debido al proceso de corrosión por picadura. Aumento 5X.</p>	
Toma 2	
<p>Metalografía de afectación de la corrosión por picadura en el cordón de soldadura, se puede observar el desprendimiento del material el borde. Aumento 10X</p>	

Continuación tabla 3.19.

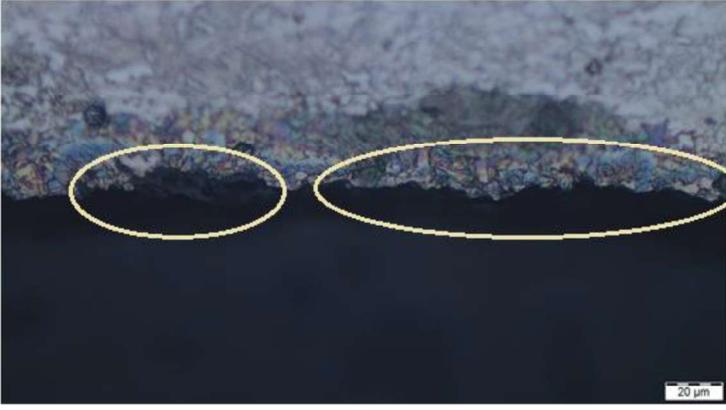
Toma 3	
<p>Metalografía con un aumento de 50X en los puntos más demostrativos de la existencia del avance de la corrosión por picadura y por ende desprendimiento de material a través del límite de grano.</p>	

(Fuente: Propia)

Tabla 3.20: Metalografía corte transversal probeta TA lado A.

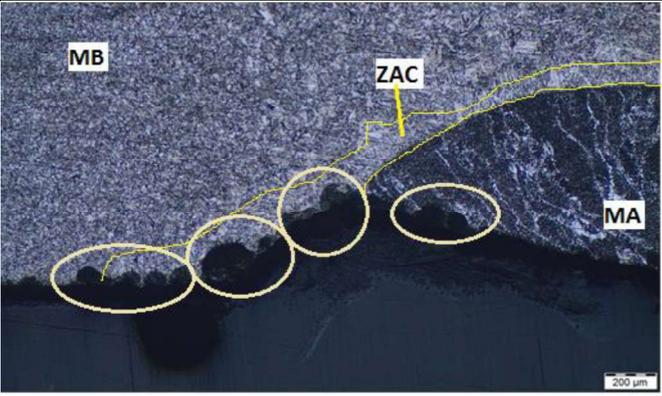
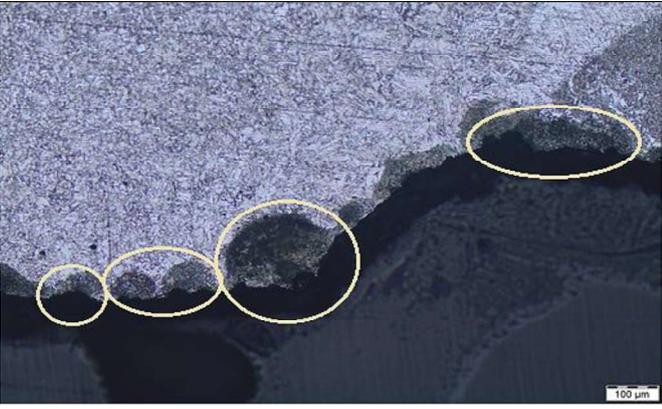
Toma 1	
<p>Metalografía correspondiente a la probeta TA lado A en la cual se identifican la ZAC y el material de aporte además de mostrar el desprendimiento de material debido al proceso de corrosión por picadura. Aumento 5X.</p>	
Toma 2	
<p>Metalografía de afectación de la corrosión en la ZAC, se puede observar el desprendimiento del material en el borde. Aumento 10X.</p>	

Continuación 3.20.

Toma 3	
<p>Metalografía con un aumento de 50X en los puntos más demostrativos de la existencia del avance de la corrosión por picadura y por ende desprendimiento de material a través del límite de grano.</p>	

(Fuente: Propia)

Tabla 3.21. Metalografía corte transversal probeta TA lado B.

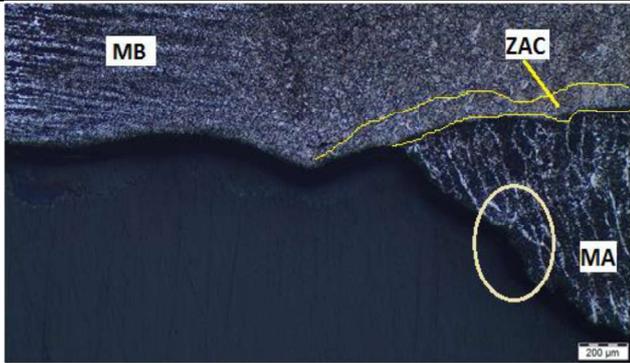
Toma 1	
<p>Metalografía correspondiente a la probeta TA lado B en la cual se identifican ZAC y el material de aporte también se observa el desprendimiento de material debido al proceso de corrosión por picadura. Aumento 5X.</p>	
Toma 2	
<p>Metalografía de afectación de la corrosión por picadura en la ZAC y el cordón de soldadura, se puede observar el desprendimiento del material en el borde. Aumento 10X</p>	

Continuación 3.21.

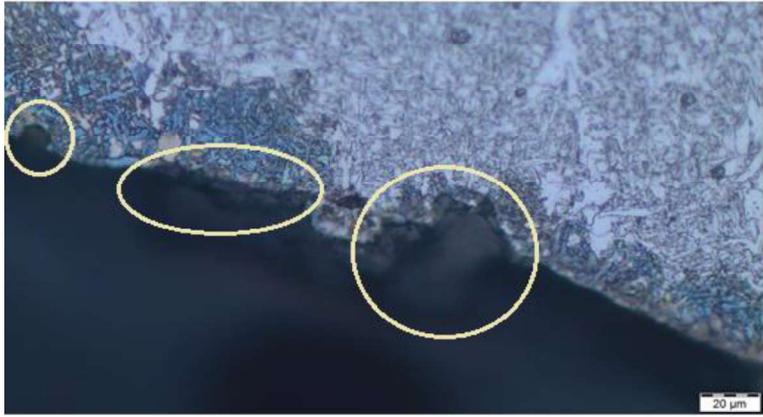
Toma 3	
<p>Metalografía con un aumento de 50X en los puntos más demostrativos, se observa la existencia del avance de la corrosión por picadura y por ende desprendimiento de material a través del límite de grano.</p>	

(Fuente: Propia)

Tabla 3.22. Metalografía corte transversal probeta TR lado A.

Toma 1	
<p>Metalografía correspondiente a la probeta TR lado A en la cual se identifican la ZAC y el material de aporte además de mostrar el desprendimiento de material debido al proceso de corrosión por picadura. Aumento 5X.</p>	
Toma 2	
<p>Metalografía de afectación de la corrosión por picadura en la ZAC y el cordón de soldadura, se puede observar el desprendimiento del material el borde. Aumento 10X</p>	

Continuación tabla 3.22.

Toma 3	
<p>Metalografía con un aumento de 50X en los puntos más demostrativos, se observa la existencia del avance de la corrosión por picadura y por ende desprendimiento de material a través del límite de grano.</p>	

(Fuente: Propia)

Tabla 3.23. Metalografía corte transversal probeta TR lado B.

Toma 1	
<p>Metalografía correspondiente a la probeta TR lado B en la cual se identifican la ZAC y el material de aporte además de mostrar el desprendimiento de material debido al proceso de corrosión por picadura. Aumento 10X.</p>	
Toma 2	
<p>Metalografía de afectación de la corrosión por picadura en la ZAC y el cordón de soldadura, se puede observar el desprendimiento del material el borde. Aumento 10X</p>	

Continuación tabla 3.23.



(Fuente: Propia)

3.3.5. Profundidad de corrosión

Los datos de profundidad y ancho de corrosión se derivan de las tres muestras tomadas para los análisis ya que se detallan las indicaciones más prominentes que corresponden al corte transversal de las probetas. Para ello, en la Tabla 3.24., se muestran los valores del área, y profundidad de corrosión con respecto a las dimensiones totales que fueron sometidas al ensayo siendo ellas del primer grupo sin tratamiento térmico (ST).

La figura 3.10. y 3.11. muestran el área total, ancho y largo del cordón de soldadura, mientras que las Figuras 3.12. y 3.13. muestran las medidas de las picaduras.

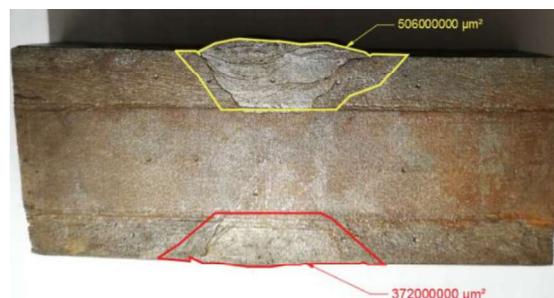


Figura 3.10. Área total de los dos lados correspondientes a la probeta ST, corte transversal.
(Fuente: Propia)

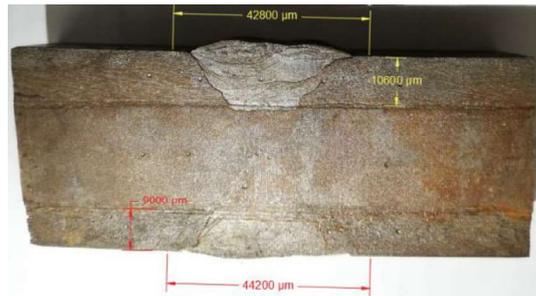


Figura 3.11: Largo y ancho total dos lados correspondientes a la probeta ST, corte transversal. (Fuente: Propia)



Figura 3.12: Área de corrosión los dos lados correspondientes a la probeta ST, corte transversal. (Fuente: Propia)

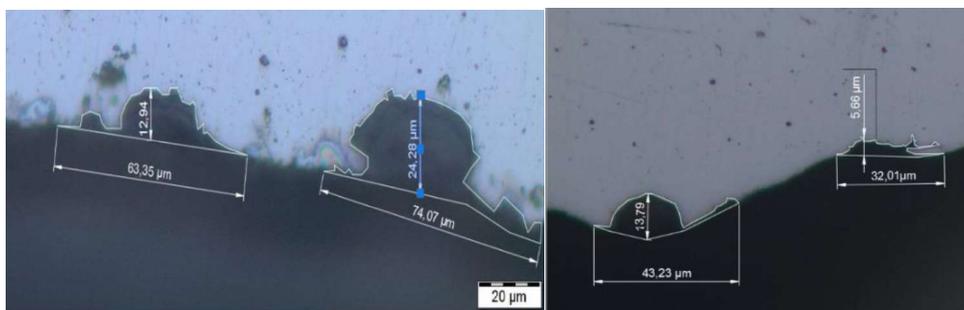


Figura 3.13: Largo y profundidad de las picaduras más representativas de la probeta ST, corte transversal. (Fuente: Propia)

Tabla 3.24: Dimensiones promedio de la probeta ST, corte transversal.

Probeta ST- Corte transversal		
	Total	Zona de corrosion
Area Promedio	439 [mm2]	128 [um2]
Largo Promedio	43.5 [mm]	0.0532 [um]
Profundidad Promedio	9.8 [mm]	0.0141 [um]

(Fuente: Propia)

A partir de las imágenes 3.14. a 3.17. mostradas a continuación, se elabora la Tabla 3.25, en donde se muestran las dimensiones promedias de corrosión para las probetas correspondientes al grupo con tratamiento térmico de recocido (TA) con respecto a las dimensiones totales del corte transversal de la probeta con mayor corrosión de este grupo antes mencionado.

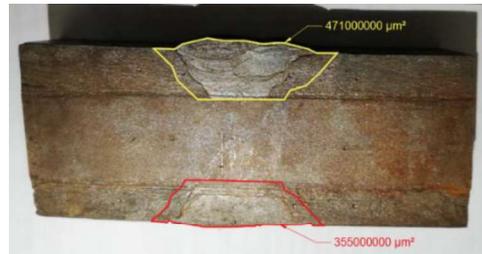


Figura 3.14: Área total de los dos lados correspondientes a la probeta TA, corte transversal.
(Fuente: Propia)

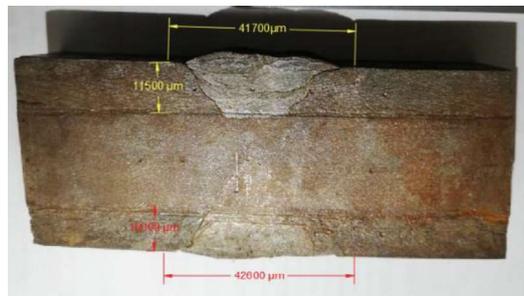


Figura 3.15: Largo y ancho total dos lados correspondientes a la probeta TA, corte transversal.
(Fuente: Propia)

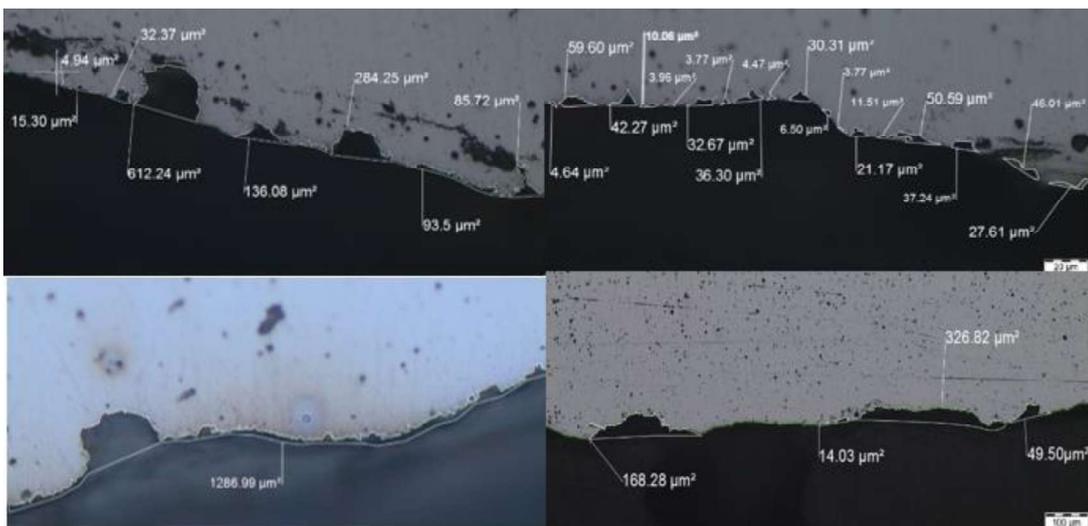


Figura 3.16: Área de corrosión los dos lados correspondientes a la probeta TA, corte transversal.
(Fuente: Propia)

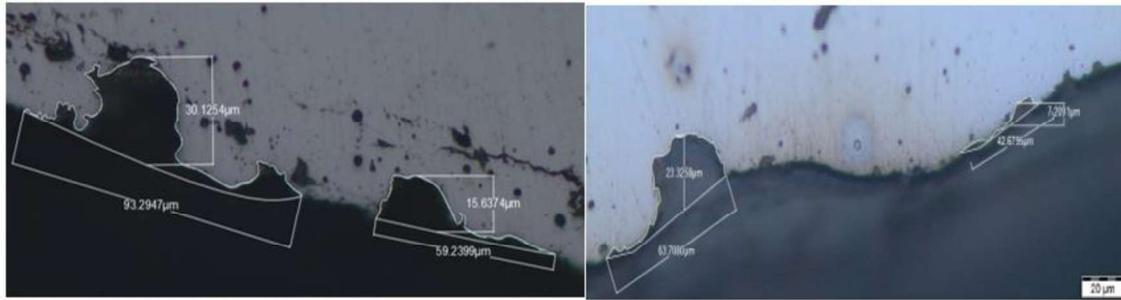


Figura 3.17: Largo y profundidad de las picaduras más representativas de la probeta TA, corte transversal.
(Fuente: Propia)

Tabla 3.25: Dimensiones promedio de la probeta TA, corte transversal.

Probeta TA- Corte transversal		
	Total	Zona de corrosion
Area Promedio	413 [mm ²]	78.2 [um ²]
Largo Promedio	42.15 [mm]	64.7 [um]
Profundidad Promedio	10.75 [mm]	16.4 [um]

(Fuente: Propia)

A partir de las figuras 3.18. a 3.21. se elabora la Tabla 3.26, la cual muestra las dimensiones del área, largo y profundidad totales respecto de las de las zonas de corrosión del último grupo de probetas aplicadas tratamiento térmico para aliviar tensiones residuales (TR).



Figura 3.18: Área total de los dos lados correspondientes a la probeta TR, corte transversal.
(Fuente: Propia)

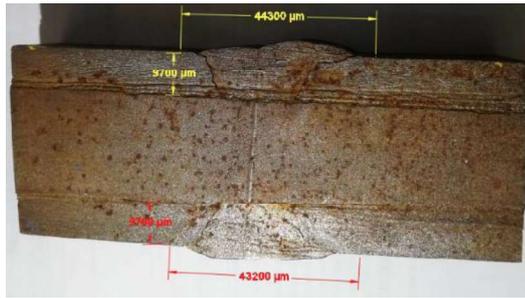


Figura 3.19: Largo y ancho total dos lados correspondientes a la probeta TR, corte transversal. (Fuente: Propia)

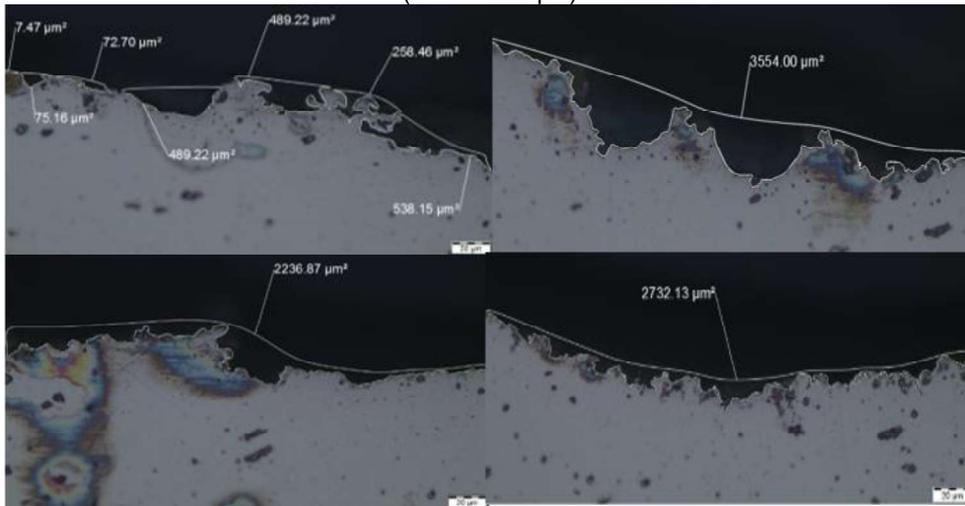


Figura 3.20: Área de corrosión los dos lados correspondientes a la probeta TR, corte transversal. (Fuente: Propia)



Figura 3.21: Largo y profundidad de las picaduras más representativas de la probeta TR, corte transversal. (Fuente: Propia)

Tabla 3.26: Dimensiones promedio de la probeta TR, corte transversal.

Probeta TR- Corte transversal		
	Total	Zona de corrosion
Area Promedio	398 [mm ²]	260 [um ²]
Largo Promedio	43.75 [mm]	58 [um]
Profundidad Promedio	9.7 [mm]	19.3 [um]

(Fuente: Propia)

Las picaduras que se pueden observar mediante las Figuras 3.12., 3.16. y 3.20., según la norma ASTM G46-94, son de tipo elípticas, subsuperficiales y ancho poco profundo en el extremo del cordón de soldadura; con la ayuda de la Tabla 3.27. se muestra que en las probetas del grupo ST la profundidad de corrosión respecto al espesor total de la probeta es de 0.0014 %; para las muestras TA es de 0.152 % y para las muestras TR es de 0.199%, es decir, la profundidad de la corrosión incrementa debido a los cloruros presentes en las celdas anódicas.

Tabla 3.27: Comparación de profundidades de corrosión entre todos los grupos.

Profundidad Promedio			
	Total	Zona de corrosion [mm]	Relacion %
ST	9.8	1.41E-05	1.44E-04
TA	10.75	1.64E-02	1.52E-01
TR	9.7	1.93E-02	1.99E-01

(Fuente: Propia)

3.4. Dureza

Para la medición de ésta propiedad se tiene como guía los puntos a comparar, mismos que están en las zonas de estudio Figura 3.22. como son zona afectada por el calor y el cordón de soldadura, con el fin de determinar el cambio significativo respecto a la dureza en el material. Los resultados se presentan en las Tablas 3.28., 3.29., y 3.30.; donde se detallan los valores que se obtienen después de realizado el ensayo de corrosión a las probetas con cada tratamiento térmico, cabe mencionar que las tablas se mostraran para los dos lados del cordón de soldadura A y B.

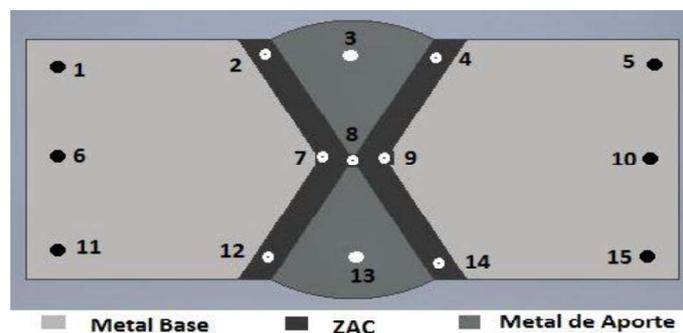


Figura 3.22: Esquema del ensayo de dureza aplicado en el corte transversal.
(Fuente: Propia, 2019)

Tabla 3.28: Durezas de la probeta sin tratamiento térmico (ST).

ZONA	ESCALA	MB	ZAC	MA	ZAC	MB
SUPERIOR	HRB	79	-	77,5	-	79
	HRC	-	16	-	15	-
	HB	147	204	142,5	199	147
CENTRAL	HRB	82	-	-	-	83
	HRC	-	22	20	21	-
	HB	156	236	225	231	159
INFERIOR	HRB	82	-	79	-	82
	HRC	-	14	-	13	-
	HB	156	194	147	189	156

(Fuente: Propia)

Tabla 3.29: Durezas de la probeta con tratamiento recocido (TA).

ZONA	ESCALA	MB	ZAC	MA	ZAC	MB
SUPERIOR	HRB	77	81	74	82	77
	HRC	-	-	-	-	-
	HB	141	147	130	144	141
CENTRAL	HRB	78	88	-	89	80
	HRC	-	-	10	-	-
	HB	144	176	173	180	150
INFERIOR	HRB	76	82	73	83	79
	HRC	-	-	-	-	-
	HB	139	156	132	159	147

(Fuente: Propia)

Tabla 3.30: Durezas de la probeta con tratamiento térmico para aliviar tensiones residuales (TR).

ZONA	ESCALA	MB	ZAC	MA	ZAC	MB
SUPERIOR	HRB	80	83	72	82	78
	HRC	-	-	-	-	-
	HB	150	159	130	156	144
CENTRAL	HRB	79	-	-	-	80
	HRC	-	17	15	16	-
	HB	147	209	199	204	150
INFERIOR	HRB	78	83	75	83	81
	HRC	-	-	-	-	-
	HB	144	159	137	159	153

(Fuente: Propia)

Se realizó un análisis comparativo de los datos obtenidos en éste estudio, respecto a los del trabajo de titulación (Campos & Jaramillo,2018); los puntos de indentación fueron dispuestos como indica la Figura 3.21., A continuación, se muestran valores de dureza finalizado el ensayo de corrosión, en donde se puede corroborar que el efecto de la corrosión está relacionado con esta propiedad mecánica dando como resultados valores menores a los de referencia (ANEXO IX).

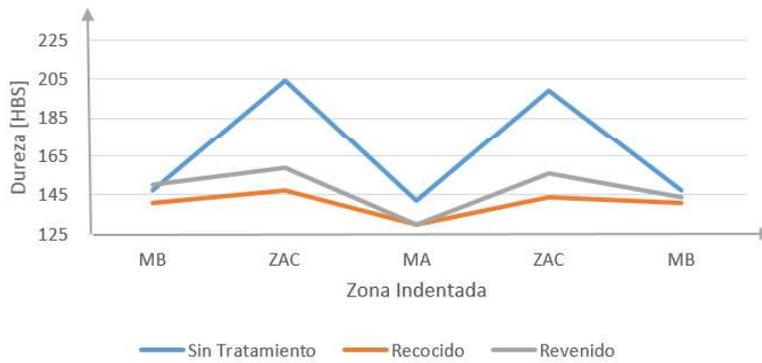


Figura3.23. Dureza en la zona superior de las probetas ST, TA, TR.

(Fuente: Propia)

Los resultados de dureza en la zona superior para el grupo sin tratamiento (ST) disminuye, en un 5.77% en el material base, un 14.64% en la ZAC y un 14.42% en el cordón de soldadura. Para los especímenes de tratamiento recocido (TA) se calculó la disminución en un 6% para el material base, en la ZAC 10.91% y en el material de aporte 19.75%. Para finalizar las del grupo de tratamiento térmico para aliviar tensiones residuales (TR), muestran la reducción en un 12.79% para el material base, 10.67% en la ZAC y 23.30% en el cordón de soldadura; valores relacionados con los de referencia. (ANEXO IX).

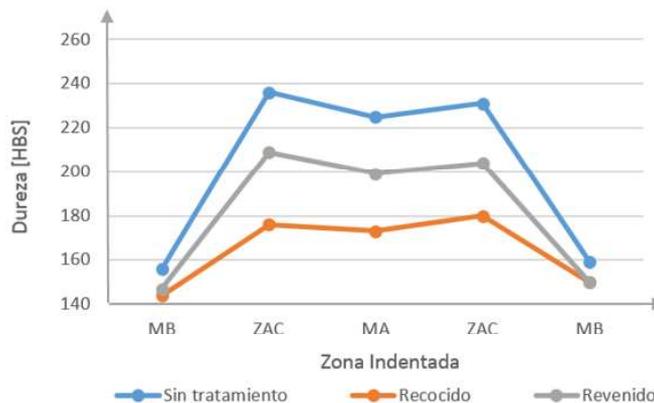


Figura.3.24: Dureza en la zona central de las probetas ST, TA, TR.

(Fuente: Propia)

Para la zona central la dureza no fue afectada por la corrosión, ya que ésta solo afectó hasta niveles subsuperficiales debido a los días de exposición y concentración de la solución, además, del espesor de las probetas.

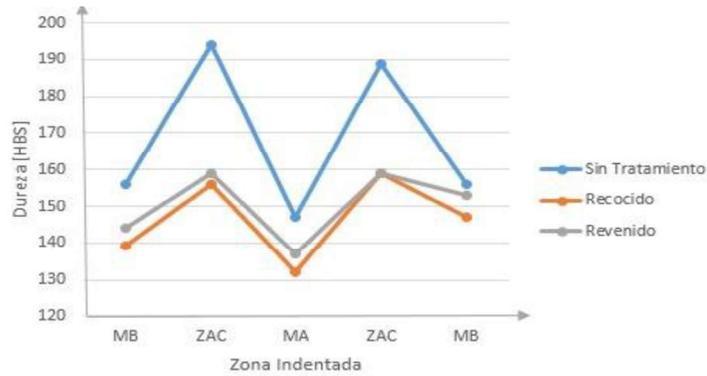


Figura 3.25: Dureza en la zona inferior de las probetas ST, TA, TR.

(Fuente: Propia)

En esta región los valores de dureza redujeron, en el grupo sin tratamiento un 7.69% en el material base, en la ZAC en un 9.35% y 18.33% en el cordón de soldadura. Para los especímenes de tratamiento recocido un 5.88% en el material base, en la ZAC es 5.92% y en el material de aporte 16.97%. y en las del grupo de tratamiento térmico para aliviar tensiones residuales un 9.15% en el material base, 16.13% en la ZAC y 25% en el cordón de soldadura.

3.5. Microdureza

Este ensayo de precisión consiste en generar una huella muy pequeña como indica la Figura 3.26., para medir la dureza en este caso la superficial, específicamente en el borde por donde ingresa la corrosión durante el ensayo, se lo realiza mediante la aplicación de cargas muy pequeñas pues para este estudio se lo efectúa con una carga de 200 [kgf] basándose en documentos bibliográficos que estarán mencionados en la sección de Referencias Bibliográficas.

Las indentaciones fueron realizadas en los dos lados del cordón tanto A como B y en donde se observó que la afectación fue más visible como muestra la Figura 3.27.

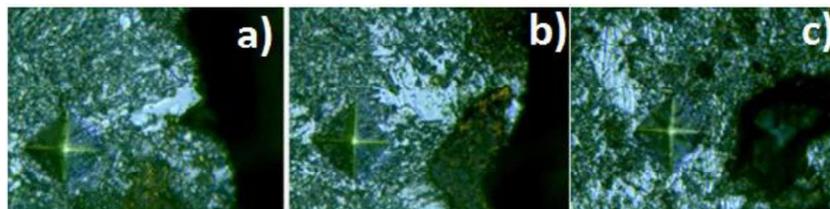


Figura 3.26: Indentaciones en el borde de microdureza a)Probeta ST b)Probeta TA c)Probeta TR.

(Fuente: LMDF,2019)

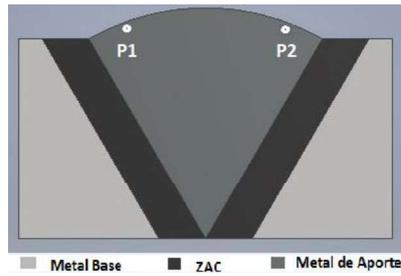


Figura 3.27: Esquema del ensayo de microdureza aplicado en el corte transversal.
(Fuente: Propia, 2019)

Los resultados dados por el programa Kameran 122, se manifiestan en la tabla 3.31.

Tabla 3.31: Resultados de microdureza en las muestras seleccionadas de cada grupo de tratamientos térmicos.

Identificacion	HV	D1	D2	Mean Diagonal (um)
ST_A	193.38	44.39	43.39	43.89
ST_B	187.48	43.14	45.8	44.47
Mean ST	190.43	43.77	44.60	44.18
TA_A	182.05	46.07	44.21	45.14
TA_B	173.77	45.85	46.62	46.24
Mean TA	177.91	45.96	45.415	45.69
TR_A	176.85	44.18	47.48	45.83
TR_B	178.08	47.41	43.86	45.63
Mean TR	177.465	45.795	45.67	45.73

(Fuente: LMDF,2019)

En la Tabla 3.31., se muestran los valores promedios de microdureza para el lado A y B, tomados basándose en la norma ASTM E92-17 (ANEXO X), se obtuvo un promedio global para todos los grupos de diferentes tratamientos térmicos post-soldadura siendo: 190.43 [HV] para la muestra sin tratamiento, 177.91 [HV] para la muestra con recocido y 177.46 [HV] para el tratamiento térmico para aliviar tensiones residuales, nombradas de mayor a menor valor, teniendo en cuenta que la dureza para el material de aporte y proceso de soldadura es de 217 [HV]. (Atkins G, Thiessen D, 2002); por lo cual se compara con ésta referencia resultando que la muestra ST baja 12.24%, la probeta TA disminuye un 18.02% y por último la TR desciende en 18.23%. Comprando que esta propiedad mecánica disminuyó producto del proceso de la corrosión.

3.6. Análisis de resultados

En este capítulo se realiza un análisis de los resultados obtenidos mediante el uso de gráficas para indicar el comportamiento del acero estructural ASTM A572 ante un ensayo de corrosión con cloruro férrico; mismas que indicarán la velocidad de corrosión, tamaño promedio y profundidad de las picaduras generadas por este ensayo, así como la dureza aplicadas a las probetas antes y después de realizado el ensayo.

3.6.1. Ensayo no destructivo mediante líquidos penetrantes

Como se detalla en la Tabla 3.1 a todas las placas con tratamiento térmico post-soldadura se las ha denominado de la siguiente manera: P1 (recocido), P2 (tratamiento térmico para aliviar tensiones residuales) y P3 (sin tratamiento térmico) de ambos lados A y B, no se observan ninguna indicación por lo que según la norma AWS D1.1 en el literal 8.1 correspondiente a inspección visual cumple con todos los criterios de aceptación para lo cual se concluye que la soldadura es aceptada.

3.6.2. Ensayo metalográfico inicial

Según (LAJTIN, 1977) las aleaciones que poseen una concentración de carbono del 0.025 al 0.8 % se llaman aceros hipoeuctectoides. Estos tienen una estructura ferrítica y perlítica las mismas que se presentan en el material base de todas las probetas, pues comúnmente en este tipo de acero de bajo porcentaje de carbono producido por laminado se presentan estas estructuras alineadas en dirección del conformado en caliente terminado en frío, como se corrobora en las Tablas 3.2-3.4.

(Va Larre, 2010) indica que por las altas temperaturas en el aporte y zonas afectadas por el calor en soldaduras o durante transformaciones en estado sólido, cuando la velocidad de enfriamiento es demasiado alta para permitir la formación de ferrita intergranular, se origina la ferrita en estructura de Widmanstätten. Por lo tanto, mediante la Tabla 3.2., la probeta ST muestra ferrita y perlita además de presentar muchas inclusiones no metálicas. En la Tabla 3.3 para las probetas TA por efecto del tratamiento en la recristalización de fase que tiene lugar durante el recocido, afina el grano y elimina la estructura Widmanstätten y debido al enfriamiento lento, se disponen triangularmente agujas de ferrita, y según la velocidad de dicho enfriamiento aparecen laminas gruesas de perlita acercándose a un equilibrio de estructura y de fase.

En las tablas 3.4. para el grupo de probetas con tratamiento térmico para aliviar tensiones residuales (TR) se presentan ferrita, perlita (ferrita y cementita), pero debido a que la temperatura alcanzada fue de 275° C, éstas no alcanzan dicho equilibrio, por ende, tampoco eliminar la ferrita en estructura de Widmanstätten.

3.6.3. Discusión del ensayo de corrosión

En esta sección se analizarán los resultados específicamente del efecto del ensayo de corrosión sobre las probetas que han sido separadas según el tratamiento térmico post-soldadura al que fueron sometidos.

Al analizar las Tablas 3.9. – 3.17, donde se muestra la superficie expuesta a la corrosión, se puede evidenciar que el material base sufrió una leve afectación de la corrosión por picadura respecto al resto de zonas de las probetas. A pesar de que se les realiza un precalentamiento a 65° C previo a la soldadura, un tratamiento recocido a 650°C y tratamiento para aliviar tensiones residuales a 275 °C, la microestructura no ha sufrido cambios, según (Lippold , 2015) a temperaturas bajo la crítica (723 °C) no ocurre ningún tipo de transformación microestructural. Corroborando que la microestructura en el material base es la misma para todos los grupos.

La corrosión por picadura reacciona con las microestructuras, como indica (Barón , Quiroz , & Rosales , 2009) el proceso de corrosión se da inicialmente en la perlita, la misma que está formada por cementita (metaestable) y ferrita las cuales actúan como ánodo y cátodo respectivamente en un proceso electroquímico. Los productos de corrosión que quedaron de la perlita reaccionan como ánodo ante la matriz ferrítica-perlítica permitiendo que la corrosión continúe.

Al finalizar el ensayo de corrosión se realizó metalografías (Tablas 3.18 – 3.23) con una variación de magnificación entre 5X y 50X, a las probetas que presentaron mayor afectación, se efectuó enfoques a los bordes de las probetas con el fin de observar como la corrosión ingresó y avanzó durante el proceso de corrosión, ya que ésta se dirige a través del límite de grano donde existe desprendimiento de material pronunciado, como se observa en las Tomas 2 y 3 de las tablas ya nombradas.

Al realizar un análisis de la Figura 3.28. es visible la afectación de la corrosión acelerada por picaduras en la pérdida de material; reducción que está relacionada con la velocidad de corrosión, profundidad y tamaño de las picaduras. Dicho esto, se observa que las probetas con mayor desprendimiento de material son las del grupo TR ya que presentaron

una mejor disociación de la perlita debido a la velocidad de enfriamiento después del tratamiento, logrando así dejar mayor espacio interlaminar entre la ferrita y cementita, espacios que se saturan en iones Fe^+ , teniendo lugar la precipitación de óxidos y oxihidróxidos de hierro. De esta manera la formación de carbonato de hierro (precipitado anaranjado) en la superficie del metal se inicia sobre la perlita, sirviendo de anclaje para estos productos de corrosión, resultados similares a los obtenidos en el estudio de (Barón, Quiroz, & Rosales, 2009)

Para el caso del grupo ST los resultados de pérdida de masa son intermedios, que a pesar de no haber sido sometido a ningún tratamiento térmico éste se ve afectado por las imperfecciones, inclusiones y discontinuidades (Tablas 3.9 y 3.10.), causadas por la soldadura actuando como concentradores de tensiones permitiendo que la solución química se aloje facilitando el desprendimiento de material.

En las probetas TA se presentó los valores más bajos en lo que respecta a pérdida de masa, ya que, como se menciona en (LAJTIN, 1977), éste tratamiento térmico se lo aplica con el fin de eliminar tensiones, afinar el tamaño de grano logrando una estabilidad estructural y de fases que, por ende ayuda a mejorar sus propiedades mecánicas.

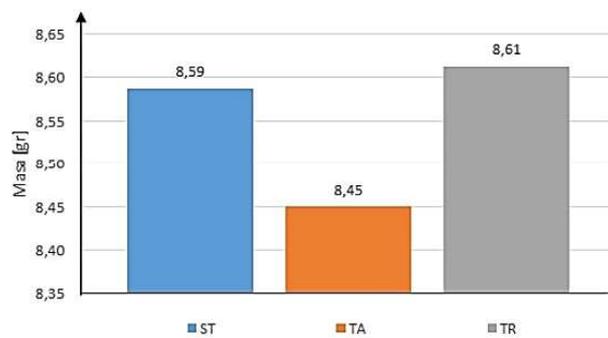


Figura 3.28. Variación de masa entre tratamientos térmicos.
(Fuente: Propia)

Se ha tomado a la dureza como propiedad mecánica para realizar la comparación con el trabajo de titulación de referencia (Campos & Jaramillo, 2019); con el fin de analizar la sensibilidad ante la corrosión que presentan los diferentes grupos de tratamientos. Por lo tanto, al finalizar el ensayo acelerado de corrosión por picadura, como se observa en las Figuras 3.23 - .3.25., la dureza y por ende la microdureza disminuyen en todos los grupos en la zona superior e inferior dado que estas zonas estuvieron en contacto con la solución

química. Como se explicó anteriormente la perlita fue afectada por la corrosión, pues, al ser ésta el componente más duro presente en las probetas por contener cementita en su constitución, esta propiedad se vió afectada para todos los grupos como se observa en la Figura 3.29.

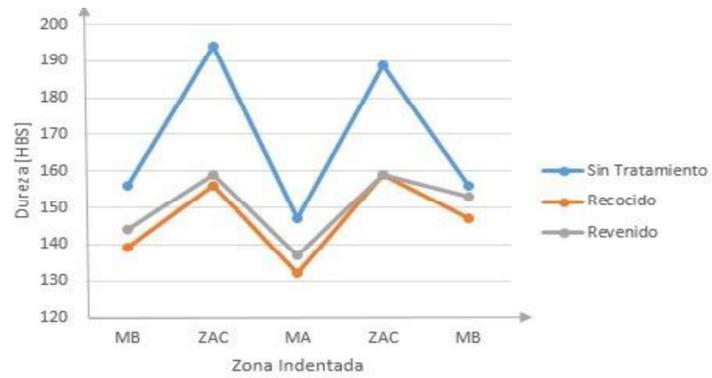


Figura 3.29: Durezas de todos los grupos, al finalizar el ensayo de corrosión.
(Fuente: Propia)

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- En el presente trabajo de investigación se lograron cumplir todos los objetivos planteados.
- Mediante el estudio de la sensibilidad de la corrosión en base a la norma ASTM G48-11 se logra analizar la sensibilidad a la corrosión del acero A572 después de haber sido soldado y tratado térmicamente, sumergido en un medio ácido de cloruro férrico.
- Del estudio de corrosión que se realizó a los elementos se determina que se generó una corrosión electroquímica a nivel subsuperficial; ésta la corrosión ingresó a través de la perlita que al ser un material compuesto (ferrita y cementita) estos se comportaron como ánodo y cátodo respectivamente, pues, la cementita por su naturaleza tiende a descomponerse más fácilmente que la ferrita.
- Las picaduras presentes en el cordón de soldadura, durante las 144 horas de inmersión iniciales, incrementó en un 21.43% para los elementos con recocido, un 31.25% en las probetas con tratamientos térmico para aliviar tensiones residuales y en un 26.32% para las probetas sin ningún tratamiento; todos respecto al día en que se dio inicio al ensayo de corrosión.
- El grupo de muestras con tratamiento térmico para aliviar tensiones residuales (TR) son las que mayor pérdida de masa y, por ende, velocidad, tamaño y profundidad de corrosión presentaron, disminuyendo 8.9 [gr], un 8.6 [gr] en los componentes sin tratamiento y por último 8.45 [gr] en los especímenes con recocido (TA), resultando ser éste último grupo el que mejor reaccionó ante la corrosión acelerada gracias a que en este tratamiento se logra equilibrar las fases de ferrita y perlita actuando resistentemente ante la corrosión.
- Las microestructuras del acero ASTM A572 no cambian en el transcurso del estudio dado que, las temperaturas de los tratamientos térmicos post-soldadura estuvieron por debajo de la de transformación de fase (723 °C) y el bajo contenido de carbono permite que la velocidad de corrosión sea lenta, es por ello que se observa en las macrografías y metalografías daños solamente a nivel subsuperficial.
- Mediante la interpretación de las macrografías realizadas durante éste estudio se observó que la zona más afectada por la corrosión, fue el cordón de soldadura, debido a la falta de homogeneidad, imperfecciones, inclusiones y discontinuidades

propias de la soldadura, actuando como ánodos y cátodos, dando lugar a la pérdida de masa que es común en reacciones químicas y electroquímicas de la corrosión.

- La dureza de este acero estructural en éste estudio se ve afectada por la corrosión, ya que en el cordón de soldadura disminuye un 24% para el tratamiento térmico para aliviar tensiones residuales, un 17.2% para las muestras sin ningún tratamiento y 17.87% para el recocido, porcentajes que facilitan notar la influencia de los tratamientos térmicos post-soldadura en los cambios de esta propiedad mecánica.
- La perlita presente en las probetas realizadas el tratamiento recocido está en igual proporción que la ferrita, con respecto a las probetas realizadas el tratamiento para aliviar tensiones residuales, por lo cual, el TA tiene un menor impacto corrosivo.
- Los resultados verifican el efecto de los tratamientos post-soldadura a las muestras y como éstos se comportan ante la corrosión.

4.2 RECOMENDACIONES

- Es recomendable realizar precalentamiento y control de temperatura entre pases durante el proceso de soldadura, para evitar la generación de fases no deseables en las muestras que dificulten el análisis de corrosión.
- Realizar un estudio de los aleantes del material de aporte con el fin de tener una referencia que facilite el análisis de corrosión en esta zona.
- En la toma de datos de las durezas y microdureza tener en cuenta los parámetros de las máquinas además de la ubicación de las indentaciones en las probetas antes y después de este ensayo de corrosión ya que estas influirán en los resultados obtenidos.

4.3 TRABAJOS FUTUROS

- Se puede realizar este estudio de corrosión mediante un método no acelerado, como por ejemplo en una cámara salina para comprobar si la influencia del tiempo de exposición varía las propiedades tanto del material base como las del de aporte.
- Realizar el ensayo de corrosión acelerada en medios químicos más agresivos o con mayores concentraciones en peso, para conocer si estos influyen en este tipo de aceros de bajo contenido de carbono.

Referencias Bibliográficas

- Adewuyi, R. A. (2016). Impact of Post-Weld Heat Treatment (PWHT) on the Hardness and Microstructure of Low Carbon Steel. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*.
- AHMSA. (2013). *Manual de Diseño para la Construcción con Acero*. México: AHMSA.
- Andrade, C. (1982). *Corrosion y Protección de Armaduras*. Informes de la Construcción, ISSN 0020-0883.
- Aperam. (2014). *Corrosion Stainless steel*. Obtenido de www.aperam.com
- ASTM. (2013). *ASTM A572/572M: Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Structural Steel*. Estados Unidos: ASTM INTERNATIONAL.
- ASTM. (2013). *ASTM E8/E8M: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. Estados Unidos: ASTM INTERNACIONAL.
- ASTM. (2015). *ASTM E10-15: Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials*. Estados Unidos: ASTM INTERNATIONAL.
- ASTM. (2015). *ASTM G46-94: Standard Guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion*. Estados Unidos: ASTM INTERNATIONAL.
- ASTM. (2015). *ASTM G48-11: Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys by Use of Ferric Chloride Solution*. Estados Unidos: ASTM INTERNATIONAL.
- ASTM. (2017). *ASTM E92-17: Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials*. Estados Unidos: ASTM INTERNATIONAL.
- ASTM. (2017). *ASTM G1-03: Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens*. Estados Unidos: ASTM INTERNATIONAL.
- Avempase, I. (2018). *Tratamientos Térmicos y Superficiales: La Corrosión*. Obtenido de <https://chirinoosilvaroger.files.wordpress.com/2015/10/tratamientos-termicos-y-superficiales-la-corrosion.pdf>
- Barón , E., Quiroz , R., & Rosales , A. (2009). Efecto de la perlita en aceros bandeados sobre la resistencia a la corrosión por CO₂.
- Bastidas, D., & Zapico, C. (2014). Comportamiento frente a la corrosión de armaduras de acero inoxidable dúplex En solución simulada de poros de hormigón con elevado contenido de cloruros. *Revista de Metalurgia*.
- Bermúdez, C. (2005). *Curso Básico de Estructuras Metálicas*. Bogota.
- Beverkog, B. ., (1997). *Revised Pourbaix diagrams for chromium at 25-300 °C*. *Corrosion Science* 43-57.
- Bilurbina, L., Iribarren, J., & Liesa , F. (2003). *Corrosión y Protección*. Barcelona: UPC.
- Campos, C., & Jaramillo, L. (2019). *Análisis Comparativo De Las Propiedades Mecánicas De Juntas Soldadas De Acero Astm A572 Tratadas Térmicamente*. Quito: EPN.

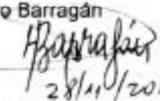
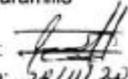
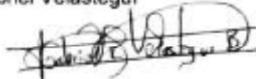
- CENIC. (2017). Ciencias Químicas. *Revista CENIC Ciencias Químicas*.
- Colpaert, H. (2005). *Metalografía Dos Productos Siderurgicos comuns*. Brasil.
- Daniel, S. (1979). *Metalurgia de la Soldadura*. Tecnos.
- García Banco, I. (2018). *Metodología para caracterización de iniciación de fatiga en condiciones de corrosión*. Oviedo: Universidad de Oviedo.
- García, C. (Junio de 2016). *corrosión por picadura*. Obtenido de <https://ingenieriamecanicacol.blogspot.com/2016/06/corrosion-por-picadura.html>
- Gómez de León, F. C. (2004). *Manual básico de corrosión para ingenieros*. Murcia: Universidad de Murcia.
- González, M. (2015). *Análisis comparativo de la velocidad de corrosión por picadura de los aceros inoxidable austeníticos UNS S30403 Y UNS S20100, bajo norma ASTM G48, en diferentes tiempos de inmersión*. Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Joshi Suraj, A. A. (2013). Hardness, Microstructure, and Residual Stresses in Low Carbon Steel Welding With Post-Weld Heat Treatment and Temper Bead Welding. *Metallurgical and Materials Transactions A*.
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2002). *Manufactura, Ingeniería y tecnología*.
- LAJTIN, Y. M. (1977). *Metalografía y tratamiento térmico de los metales*. (E. Mir, Trad.) Rusia : URSS.
- Larry, J. (2018). *Soldadura, principios y aplicaciones*.
- Lippold, J. (2015). *Welding metallurgy and weldability*. John Wiley & Sons Incorporated.
- MatWeb. (12 de Febrero de 2018). *ASTM A572 Steel, grade 50*. Obtenido de MatWeb: <http://matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=9ced5dc901c54bd1aef19403d0385d7f&ckck=1>
- Medina, C. (2007). *Corrosion microbiológica en aceros de bajo carbono*. Mexico: Unam.
- Ortiz, P. (Septiembre de 2011). *Entendiendo la corrosión en detalle y sus efectos (6ª PARTE) PICADURAS*. Obtenido de <http://todoproductividad.blogspot.com/2011/09/entendiendo-la-corrosion-en-detalle-y.html>
- Otero, A. (2010). *Planchas de Acero Carbono ASTM A572 Grado 50*. Obtenido de ASTM A572: http://www.acerosotero.cl/pdf/fichas/plancha_acero_carbono_astma572.pdf
- Palencia, L., Castillo, J., & Javier, M. (2010). *Susceptibilidad a la corrosión del acero inoxidable dúplex 2205*. Valencia: Universidad Carabobo.
- Segarra, P. (2015). *Estudios de los cambios producidos en la corrosión por picadura en el casco de acero de un barco con la temperatura del mar*. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena.
- Sturla, A. (2002). *Tratamiento Térmico de los Aceros I y II*. Buenos Aires: Nueva Librería.

Urbano, J. (2008). *METALOGRAFÍA*. Federacion Andalucia.

Va Larre. (2010). *Metalografia y Trataientos tratamientos termicos*. Argentina: UNLP.

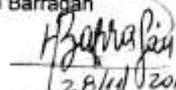
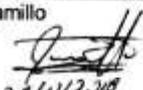
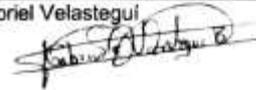
Anexos

GAS DE PROTECCION Proceso No: 1 Nombre comercial: N/A Composición: N/A Flujo: N/A Proceso No: 2 Nombre comercial: Composición: CO ₂ Flujo: 20 – 25 [lt/min]			LIMPIEZA: Proceso No: 1 - Disco - Grata Proceso No: 2 - Grata				
CARACTERISTICAS ELECTRICAS: Proceso No: 1 Corriente: AC: CCEP: X CCEN: Amperaje: Voltaje: Proceso No: 2 Corriente: AC: CCEP: X CCEN: Amperaje: Voltaje:			NOTAS:				
TRATAMIENTO TÉRMICO DESPUES DE LA SOLDADURA : Proceso No: 1 Pre calentamiento: 65 °C Post-soldadura: Proceso No: 2 Pre calentamiento: 65 °C Post-soldadura:							
Pase #	Meta de aporte		Amperaje [A]	Tensión de Trabajo		Velocidad de Avance [cm / min]	Vel. Alimentación del electrodo [m/min]
	Clase	Diámetro [mm]		Pol.	Voltaje		
1	E8010	3,2	130	DC+	23	0,092	-
2	E8011	3,2	170	DC+	23	0,054	-
3	E71T1	1,2	215	DC+	28	0,043	450
4	E71T1	1,2	217	DC+	28	0,037	450
5	E71T1	1,2	218	DC+	28	0,038	450
6	E71T1	1,2	216	DC+	28	0,042	450
7	E71T1	1,2	235	DC+	28	0,039	450
8	E71T1	1,2	255	DC+	28	0,036	450
9	E71T1	1,2	246	DC+	28	0,031	450
10	E71T1	1,2	255	DC+	27	0,037	450
11	E71T1	1,2	230	DC+	27	0,036	450
12	E71T1	1,2	210	DC+	28	0,041	450
13	E71T1	1,2	202	DC+	28	0,043	450
14	E71T1	1,2	218	DC+	28	0,036	450
15	E71T1	1,2	215	DC+	28	0,034	450
16	E71T1	1,2	212	DC+	28,5	0,044	450
17	E71T1	1,2	210	DC+	28,5	0,033	450

18	E71T1	1,2	225	DC+	28,5	0,047	450
19	E71T1	1,2	227	DC+	28,5	0,041	450
Realizado por:				Aprobado por :			
Carlos Campos Firma:  Fecha: 28/11/2018				M.Sc. Homero Barragán Firma:  Fecha: 28/11/2018			
Luis Jaramillo Firma:  Fecha: 28/11/2018				Ing. Gabriel Velastegui Firma:  Fecha: 28/11/2018			

GAS DE PROTECCION (QW-408.15) Proceso No: 1 Nombre comercial: N/A Composición: N/A Flujo: N/A Proceso No: 2 Nombre comercial: Composición: CO ₂ Flujo: 20 – 25 [lt/min]	LIMPIEZA: Proceso No: 1 - Disco - Grata Proceso No: 2 - Grata
CARACTERISTICAS ELECTRICAS: Proceso No: 1 Corriente: AC: CCEP: X CCEN: Amperaje: Voltaje: Proceso No: 2 Corriente: AC: CCEP: X CCEN: Amperaje: Voltaje:	NOTAS:
TRATAMIENTO TÉRMICO DESPUES DE LA SOLDADURA: Proceso No: 1 Pre calentamiento: 65 °C Post-soldadura: Proceso No: 2 Pre calentamiento: 65 °C Post-soldadura:	

Pase #	Meta de aporte		Amperaje [A]	Tensión de Trabajo		Velocidad de Avance [cm / min]	Vel. Alimentación del electrodo [m/min]
	Clase	Diámetro [mm]		Pol.	Voltaje		
1	E8010	3,2	128	DC+	23	0,100	-
2	E8011	3,2	128	DC+	23	0,074	-
3	E71T1	1,2	223	DC+	28	0,044	400
4	E71T1	1,2	216	DC+	28	0,049	400
5	E71T1	1,2	218	DC+	28	0,041	400
6	E71T1	1,2	214	DC+	28	0,038	400
7	E71T1	1,2	220	DC+	28	0,041	450
8	E71T1	1,2	212	DC+	28	0,032	450
9	E71T1	1,2	225	DC+	28	0,047	450
10	E71T1	1,2	218	DC+	28	0,039	450
11	E71T1	1,2	228	DC+	28	0,045	450
12	E71T1	1,2	220	DC+	28	0,049	450
13	E71T1	1,2	228	DC+	28	0,035	450
14	E71T1	1,2	235	DC+	28	0,038	450
15	E71T1	1,2	223	DC+	28	0,031	450
16	E71T1	1,2	223	DC+	28	0,032	450
17	E71T1	1,2	220	DC+	28	0,039	450

18	E71T1	1,2	216	DC+	28	0,037	450
Realizado por:				Aprobado por :			
Carlos Campos				M. Sc. Homero Barragán			
Firma: 				Firma: 			
Fecha: 25/11/2018				Fecha: 28/11/2018			
Luis Jaramillo				Ing. Gabriel Velastegui			
Firma: 				Firma: 			
Fecha: 28/11/2018				Fecha:			



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESPECIFICACIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA (WPS)**



WPS No. 3

Compañía: Escuela Politécnica Nacional
WPS No.: 0003 Norma: AWS D1.1
Revisión No.:
PQR Soporte No.: N/A

PROCESO Y TIPO DE SOLDADURA
Proceso No: 1 Proceso: SMAW
No: 2 Proceso: FCAW
Tipo proceso:
No: 1 Manual Semiautom Autom.
No: 2 Manual Semiautom Autom.

JUNTA UTILIZADA
Proceso No: 1
Tipo de junta: Ranura
Tipo de soldadura: SMAW
Posición: Todas
Cordón de respaldo: Si NO
Placa de respaldo: Si NO
Preparación de la junta: Si NO
Separación entre juntas: 3 [mm]

Proceso No: 2
Tipo de junta: Ranura
Tipo de soldadura: FCAW
Posición: Todas
Cordón de respaldo: Si NO
Placa de respaldo: Si NO
Preparación de la junta: Si NO
Separación entre juntas: 3 [mm]

METAL BASE
Proceso No: 1
Especificación y grado: ASTM A572 Gr 50
Espesor nominal: 39 [mm]

Gr-No: 2

Proceso No: 2
Especificación y grado: ASTM A572 Gr 50
Espesor nominal: 39 [mm]

Gr-No: 2

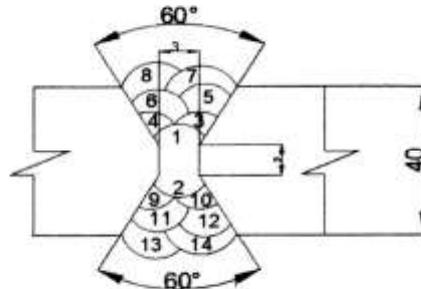
METAL DE APORTE
Proceso No: 1
Especificación o norma: 5.5
Clasificación: E8010
Diámetro: 3,2 [mm]
Casa comercial:

F-No: 3

Proceso No: 2
Especificación o norma: 5.20
Clasificación: E71T1
Diámetro: 1,2 [mm]
Casa comercial:

F-No: 6

ESQUEMA:



TÉCNICA

Proceso No: 1
Ángulo de avance:
Velocidad de avance:
Cordón: Recto Ondulado Otro
Capas: Simple Múltiple
Distancia entre pases:
Electrodo: Simple Múltiple
Vel. De alimentación del alambre:

Extensión del electrodo:
Tiempo entre pases:
Control de distorsión:
Sujeción: Si No
Tipo de sujeción:

Placas de restricción

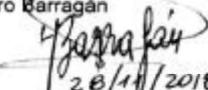
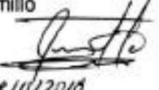
Proceso No: 2
Ángulo de avance:
Velocidad de avance:
Cordón: Recto Ondulado Otro
Capas: Simple Múltiple
Distancia entre pases:
Electrodo: Simple Múltiple
Vel. De alimentación del alambre:

3 - 3.5 [m./min.]
Extensión del electrodo:
Tiempo entre pases:
Control de distorsión:
Sujeción: Si No
Tipo de sujeción:

Placas de restricción

GAS DE PROTECCION Proceso No: 1 Nombre comercial: N/A Composición: N/A Flujo: N/A Proceso No: 2 Nombre comercial: Composición: CO ₂ Flujo: 20 – 25 [lt/min]	LIMPIEZA: Proceso No: 1 - Disco - Grata Proceso No: 2 - Grata
CARACTERÍSTICAS ELECTRICAS: Proceso No: 1 Corriente: AC: CCEP: X CCEN: Amperaje: Voltaje: Proceso No: 2 Corriente: AC: CCEP: X CCEN: Amperaje: Voltaje:	NOTAS:
TRATAMIENTO TÉRMICO DESPUES DE LA SOLDADURA: Proceso No: 1 Pre calentamiento: 65 °C Post-soldadura: Proceso No: 2 Pre calentamiento: 65 °C Post-soldadura:	

Pase #	Meta de aporte		Amperaje [A]	Tensión de Trabajo		Velocidad de Avance [cm / min]	Vel. Alimentación del electrodo [m/min]
	Clase	Diámetro [mm]		Pol.	Voltaje		
1	E8010	3,2	122	DC+	23	0,092	-
2	E71T1	1,2	242	DC+	28	0,044	450
3	E71T1	1,2	217	DC+	28	0,050	450
4	E71T1	1,2	234	DC+	28	0,036	450
5	E71T1	1,2	224	DC+	28	0,048	450
6	E71T1	1,2	236	DC+	28	0,035	450
7	E71T1	1,2	230	DC+	28	0,042	450
8	E71T1	1,2	228	DC+	28	0,037	450
9	E71T1	1,2	230	DC+	28	0,041	450
10	E71T1	1,2	238	DC+	28	0,045	450
11	E71T1	1,2	241	DC+	28	0,050	450
12	E71T1	1,2	229	DC+	28	0,041	450
13	E71T1	1,2	244	DC+	28	0,046	450
14	E71T1	1,2	232	DC+	28	0,034	450
15	E71T1	1,2	237	DC+	28	0,039	450
16	E71T1	1,2	232	DC+	28	0,040	450
17	E71T1	1,2	236	DC+	28	0,051	450

Realizado por: Carlos Campos	Aprobado por : M. Sc. Homero Barragán
Firma:  Fecha: 23/11/2018	Firma:  Fecha: 20/11/2018
Luis Jaramillo	Ing. Gabriel Velastegui
Firma:  Fecha: 26/11/2018	Firma:  Fecha: 



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**



REGISTRO DE CALIFICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO (PQR)

Nombre Compañía:	Escuela Politécnica Nacional	Fecha de realización :	28/10/2018
WPQ No.	1	Inspector:	Ing. Gabriel Velastegui
Según norma :	AWS D1.1 – 2015 "STRUCTURAL WELDING CODE - STEEL "		
WPS SOPORTE No.	2		

Nombre del Soldador :	Jorge Patricio Guzmán Enriquez	CI #:	1720117223	Código No.	SW-31
Proceso de soldadura :	MANUAL SMAW X	SEMIAUTOMÁTICO FCAW X	GMAW	AUTOMÁTICO SAW	
Tipo y grado del metal base :	ASTM A 572 Gr 50	Espesor:	40 mm.	Tipo de soldadura :	RANURA
Metal de aporte :	Especificación AWS: A 5.5 Especificación: 5.20	Denominación AWS: E 8010	Diámetro : 3,2 mm.		
Precalentamiento :	65 C	Denominación AWS: E 71T1	Diámetro : 1,2 mm.	Temperatura entre pas:	N/A
Tipo de máquina de soldar :	Lincoln Invertec V350-PRO			Potencia de la máquina de soldar:	1 220 V

PARAMETRO DE SOLDADURA				
Pase No.	1	2	3	4
Proceso :	SMAW	SMAW	FCAW	FCAW
Tipo de electrodo (AWS) :	E8010	E8010	ET1T1	ET1T1
Especificación (SFA) No.	5.5	5.5	5.20	5.20
Diámetro (mm) :	3,2	3,2	1,2	1,2
Voltaje :	23	23	28	28
Tipo de corriente y polaridad :	DC+	DC+	DC+	DC+
Código del soldador :	SW-31	SW-31	SW-31	SW-31

EXAMENES

ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS		
INSPECCIÓN VISUAL	Calificado	Descalificado
CALIFICADO	SI	DESCALIFICADO

ENSAYOS DESTRUCTIVOS

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE DOBLADO				
DOBLADOS LATERALES				
Muestra No.	Ident. de Laboratorio	Aprobado	Observaciones	
1	1DL T1-1	SI	No presenta indicaciones	
2	1DL T1-2	SI	No presenta indicaciones	
3	1DL T1-3	SI	1 indicación (1,4 mm)	
4	1DL T1-4	SI	2 indicaciones (2 mm y 2,5 mm)	
ENSAYOS DE DOBLADO.		Calificado	SI	Descalificado

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN				
TRACCIÓN				
Muestra No.	Ident. de Laboratorio	Aprobado	Observaciones	
1	T1-1	SI		
2	T1-2	SI		
ENSAYOS DE DOBLADO.		Calificado	SI	Descalificado

Limites de calificación:	El procedimiento queda habilitado para soldadura de RANURA para la posición 1G Limite de calificación en material base: Todos los materiales especificados con Grupo No 2 Espesores calificados 3,0 mm (1/8") a ilimitado El proceso de soldadura utilizado es SMAW/FCAW	
Proceso	Especificación AWS	Rango de espesor
SMAW	E8010	3 mm. ≤ t ≤ ilimitado
FCAW	E71T1	3,0 mm. ≤ t ≤ ilimitado

Nosotros certificamos que las especificaciones de este registro de soldadura son correctas, y que además los cupones fueron soldados y ensayados de acuerdo a los requerimientos de la norma AWS D1.1 / 2010 "STRUCTURAL WELDING CODE - STEEL" para calificación del procedimiento de soldadura

Realizado por:		Aprobado por:	
Carlos Campos		M. Sc. Homero Barragán	
Firma:		Firma:	
Fecha:		Fecha:	
Luis Jaramillo		Ing. Gabriel Velastegui	
Firma:		Firma:	
Fecha:		Fecha:	

ANEXO II.

PARAMETROS PARA TRATAMIENTOS TERMICOS POST SOLDADURA

Parámetros de recocido (TA)

- La temperatura de permanencia se estableció en 650 grados centígrados, debido a que la norma especifica una temperatura mínima de 595 grados centígrados como se indica en la figura 2.6. |
- El tiempo mínimo de permanencia fue calculado en función al espesor nominal, utilizando una regla de tres simple en base a los datos obtenidos de la figura 2.6:

**Table UCS-56-1
Postweld Heat Treatment Requirements for Carbon and Low Alloy Steels — P-No. 1**

Material	Normal Holding Temperature, °F (°C), Minimum	Minimum Holding Time at Normal Temperature for Nominal Thickness [See UW-40(f)]		
		Up to 2 in. (50 mm)	Over 2 in. to 5 in. (50 mm to 125 mm)	Over 5 in. (125 mm)
P-No. 1 Gr. Nos. 1, 2, 3	1,100 (595)	1 hr/in. (25 mm), 15 min minimum	2 hr plus 15 min for each additional inch (25 mm) over 2 in. (50 mm)	2 hr plus 15 min for each additional inch (25 mm) over 2 in. (50 mm)
Gr. No. 4	NA	None	None	None

Figura 2.6. Tabla UCS-56-1 Requerimientos de tratamientos térmicos post-soldadura para aceros de bajo carbono P-No.1.
(Fuente: ASME, 2017)

Tiempo [horas]	Espesor nominal [mm]
1	25
X	40

$$\frac{40 * 1}{25} = 1,6 \text{ [horas]} = 1 \text{ hora con 36 minutos}$$

- El enfriamiento para un proceso de alivio de esfuerzos debe realizarse de la manera más lenta posible, para aceros al carbón ciertos autores recomiendan una velocidad de 100 a 200 grados centígrados por hora por lo que el enfriamiento se efectuó dentro del mismo horno.

Parámetros de Revenido (TR)

Un revenido de alivio de esfuerzos comúnmente ejecutado tiene una temperatura de permanencia entre 200 y 275 grados centígrados con un tiempo de permanencia superior a las seis horas dependiendo del espesor. Por lo cual en este caso nuestras condiciones de tratamiento térmico son: tiempo de permanencia ocho horas, temperatura de permanencia de 250 grados centígrados. (Sturla, 1999)

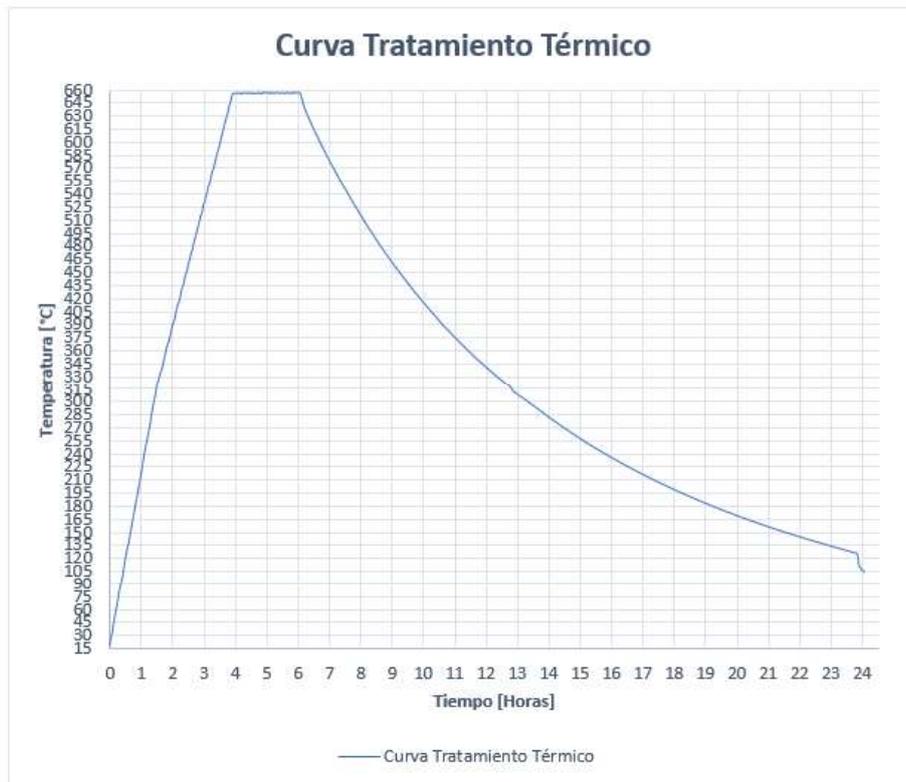
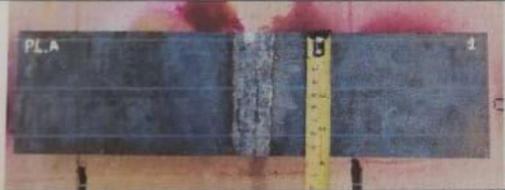
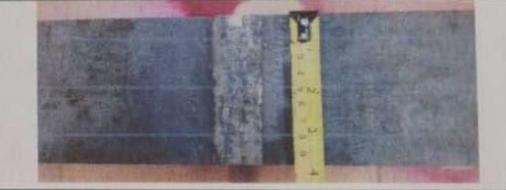
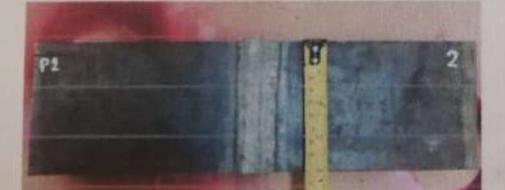
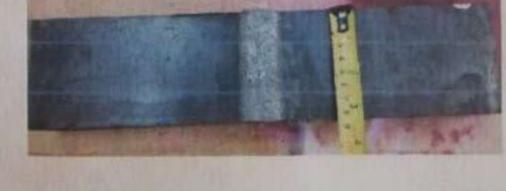


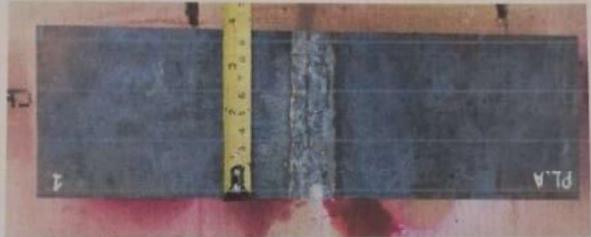
Figura 2.7. Curva de Tratamiento Térmico de Recocido.
(Fuente: Propia)

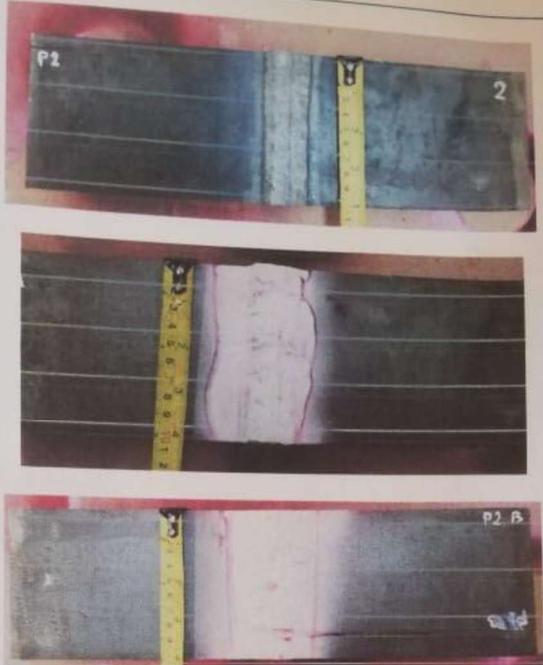


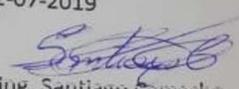
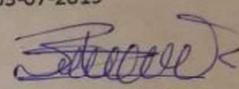
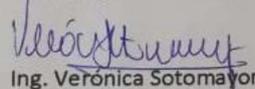
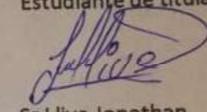
Figura 2.8. Curva del Tratamiento Térmico de Revenido.
(Fuente: Propia)

ANEXO III.
INFORME DEL ENSAYO DE TINTAS PENETRANTES

REPORTE DE INSPECCIÓN POR LIQUIDOS PENETRANTES ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS DEPARTAMENTO DE MATERIALES	
DATOS GENERALES	
Cientes: Srta. Barragán Lizeth, Sr Liive Jonathan, estudiantes de titulación	Reporte N°: LABEND-EPN-2019-R09-LP-04
Fecha: 22/04/2019	Lugar: Quito-Ecuador
IDENTIFICACIÓN DE LA PIEZA	
Descripción: 2019-R09-LP04-001: de acero soldada de L: 100 mm y Dext: 300 mm 2019-R09-LP04-002: de acero soldada de L: 100 mm y Dext: 300 mm 2019-R09-LP04-003: de acero soldada de L: 100 mm y Dext: 300 mm 2019-R09-LP04-004: de acero soldada de L: 100 mm y Dext: 300 mm 2019-R09-LP04-005: de acero soldada de L: 100 mm y Dext: 300 mm 2019-R09-LP04-006: de acero soldada de L: 100 mm y Dext: 300 mm	Identificación: 2019-R09-LP04-001 2019-R09-LP04-002 2019-R09-LP04-003 2019-R09-LP04-004 2019-R09-LP04-005 2019-R09-LP04-006
Material: Acero ASTM A572 Grado 50	Estado Superficial: Rugosidad Normal del Material
ESQUEMA DE LA PIEZA	
2019-R9-LP4-P1-A	2019-R9-LP4-P1-B
	
2019-R9-LP4-P2-A	2019-R9-LP4-P2-B
	
2019-R9-LP4-P3-A	2019-R9-LP4-P3-B
	

MATERIALES Y EQUIPOS		
Líquidos:		
Limpiador / removedor: Met-L-check E-59A		Emulsificador: N/A
Penetrante Met-L-check VP-30	Revelador Met-L-check D-70	
Accesorios: N/A		
CONDICIONES DE TRABAJO		
Procedimiento: Basado en ASTM E 165, Tipo II método A		Limpeza: Con agua
Tiempos:		
Penetrante: 12 minutos	Emulsificador: N/A	Revelador: 5 minutos
Luz de observación: Visible (sobre los 1700 lux)		Tiempo:
Normas usadas ASTM E 165		
RESULTADOS		
IDENTIFICACIÓN	IMAGEN	OBSERVACIONES
2019-R9-LP4-P1		No se observan indicaciones en ninguna de las dos superficies
		
		

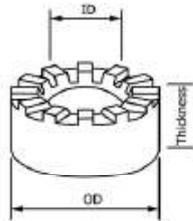
<p>2019-R9-LP4-P2</p>		<p>No se observan indicaciones en ninguna de las dos superficies</p>
<p>2019-R9-LP4-P3</p>		<p>Se observa una indicación de 3 mm de diámetro causada por la acumulación de líquido penetrante en la superficie del cordón de soldadura.</p>

OPERADOR: Ing. Santiago Camacho Nivel: LÍQUIDOS PENETRANTES –ASNT NIVEL II		Firma:
Laboratorio de Ensayos No Destructivos LAB-END		Cliente
Fecha: 02-07-2019 Firma:  Ing. Santiago Camacho Inspector Nivel II Líquidos Penetrantes. ASISTENTE DE ENSAYOS LAB-END		Fecha: 03-07-2019 Firma:  Srta. Barragán Lizeth Estudiante de titulación
Fecha: 02-07-2019 Firma:  Ing. Verónica Sotomayor JEFE LAB-END		 Sr Llive Jonathan Estudiante de titulación

ANEXO IV.

ASTM G48-11: MÉTODOS DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN POR PICADURAS Y GRIETAS DE ACEROS INOXIDABLES Y ALEACIONES RELACIONADAS MEDIANTE EL USO DE SOLUCIÓN DE CLORURO FÉRRICO

 G48 - 11



Type	Crevice Washer Dimensions						Number of Sides
	ID		OD		Thickness		
	mm	in	mm	in	mm	in	
A	6.73	0.265	15.9	0.625	2.54	0.100	12
B	6.73	0.265	15.9	0.625	6.34	0.250	12
C	9.92	0.391	15.9	0.625	6.34	0.250	12

FIG. 2 TFE-fluorocarbon Crevice Washers

5.5.2 *Low Power Microscope*, (for example, 20× magnification) for pit detection.

5.5.3 *Needle Point Dial Depth Indicator or Focusing Microscope*, to determine the depth of pitting or crevice corrosion, or both.

5.5.4 *Electronic Balance* (optional), to determine specimen mass to the nearest 0.0001 g.

5.5.5 *Camera* (optional), to photographically record the mode and extent of any localized corrosion.

6. Ferric Chloride Test Solution

6.1 For Methods A and B, dissolve 100 g of reagent grade ferric chloride, $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, in 900 mL of Type IV reagent water (Specification D1193) (about 6 % FeCl_3 by mass). Filter through glass wool or filter paper to remove insoluble particles if present.

6.2 For Methods C, D, E, and F, dissolve 68.72 g of reagent grade ferric chloride, $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ in 600 mL of reagent water and add 16 mL of reagent grade concentrated (36.5–38.0 %) hydrochloric acid (HCl). This will produce a solution containing about 6 % FeCl_3 by mass and 1 % HCl resulting in a pH controlled environment over the test temperatures (9).

7. Test Specimens

7.1 A test specimen 25 by 50 mm (1 by 2 in.) is recommended as a standard size, although various shapes and sizes can be tested by this method. All specimens in a test series should have the same dimensions when comparisons are to be made. Unless end-grain pitting is an integral part of the evaluation, the proportion of end-grain surface to specimen surface should be kept as small as possible given the limitations of specimen sizes because of the susceptibility of end-grain surfaces to pitting.

NOTE 11—The thickness of the specimen in Method B can influence the tightness of the crevice and the test results.

NOTE 12—End-grain attack in Methods C, D, E, and F may not be as prevalent in a test in which low test temperatures are anticipated.

7.2 When specimens are cut by shearing, the deformed material should be removed by machining or grinding prior to testing unless the corrosion resistance of the sheared edges is being evaluated. It is good practice to remove deformed edges to the thickness of the material.

7.3 For Methods D and F, a sufficient hole should be drilled and chamfered in the center of the specimen to accommodate the bolt and insulating sleeve used to attach the crevice device.

7.4 All surfaces of the specimen should be polished to a uniform finish. A120-grit abrasive paper has been found to provide a satisfactory standard finish. Wet polishing is preferred, but if dry polishing is used, it should be done slowly to avoid overheating. The sharp edges of a specimen should be rounded to avoid cutting rubber bands or O-rings.

NOTE 13—While a polished surface is preferred for uniformity, the test may be varied at the discretion of the investigator to evaluate other surface finishes, such as a mill finish.

7.5 Measure the dimensions of the specimen, and calculate the total exposed area of interest.

7.6 Clean specimen surfaces with magnesium oxide paste or equivalent, rinse well with water, dip in acetone or methanol, and air-dry.

7.7 Weigh each specimen to the nearest 0.001 g or better and store in a desiccator until ready for use (see Practice G1).

8. Method A—Ferric Chloride Pitting Test

8.1 Procedure:

8.1.1 Pour 600 mL of the ferric chloride test solution into the 1000-mL test beaker. If specimens larger than the standard are used, provide a solution volume of at least 5 mL/cm² (30 mL/in.²) of specimen surface area. Transfer the test beaker to a constant temperature bath and allow the test solution to come to the equilibrium temperature of interest. Recommended temperatures for evaluation are 22 ± 2°C and 50 ± 2°C.

8.1.2 Place the specimen in a glass cradle and immerse in the test solution after it has reached the desired temperature. Maintain test solution temperature throughout the test.

8.1.3 Cover the test vessel with a watch glass. A reasonable test period is 72 h, although variations may be used at the discretion of the investigator and depend on the materials being evaluated.

8.1.4 Remove the specimens, rinse with water and scrub with a nylon bristle brush under running water to remove corrosion products, dip in acetone or methanol, and air-dry. Ultrasonic cleaning may be used as a substitute method in cases in which it is difficult to remove corrosion products from deep pits.

8.1.5 Weigh each specimen to 0.001 g or better and reserve for examination (see Practice G1).

9. Method B—Ferric Chloride Crevice Corrosion Test (10)

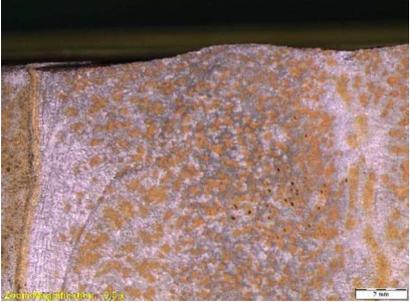
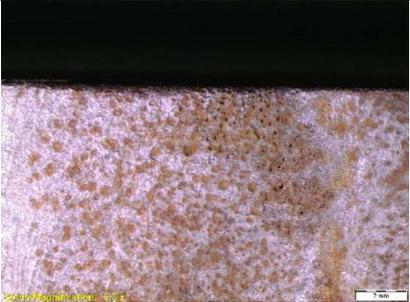
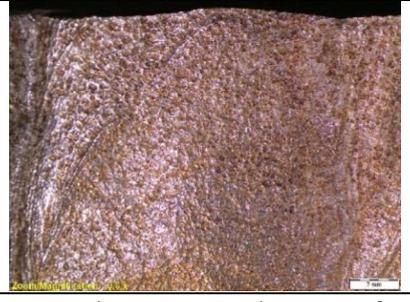
9.1 Procedure:

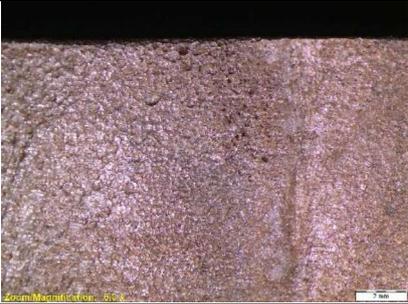
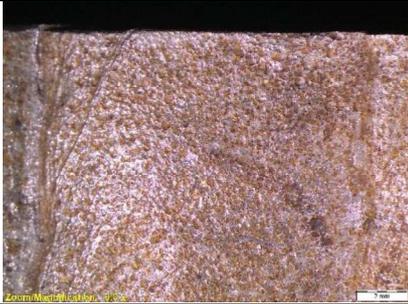
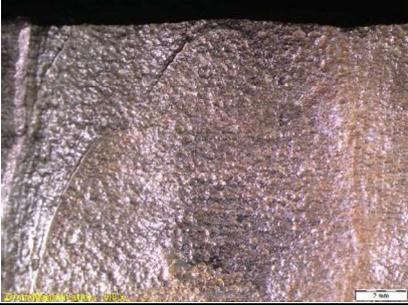
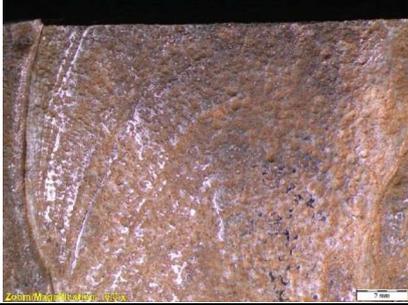
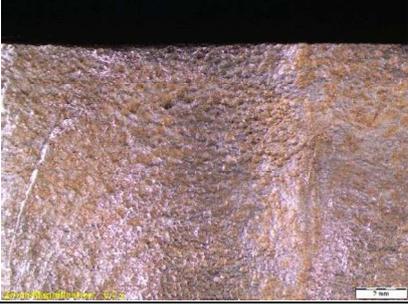
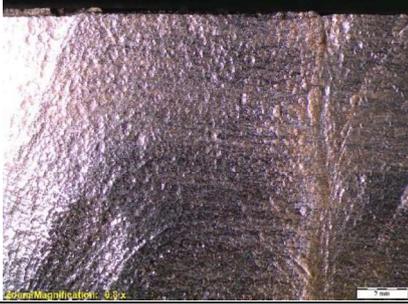
9.1.1 Add 150 mL of ferric chloride solution to each test tube, insert a rubber stopper, and place the tube in a thermostated bath until it comes to the equilibrium temperature of interest. Recommended temperatures for evaluation are 22 ± 2°C and 50 ± 2°C.

ANEXO V.

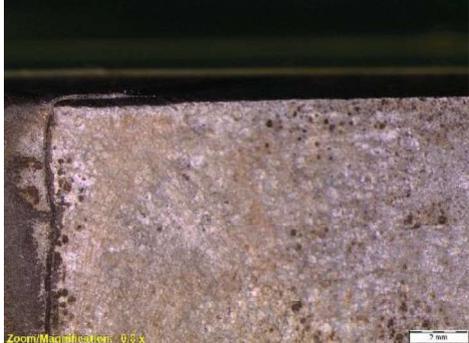
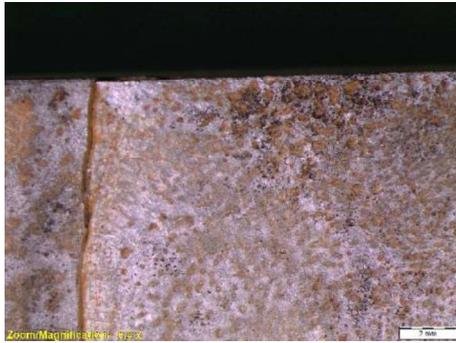
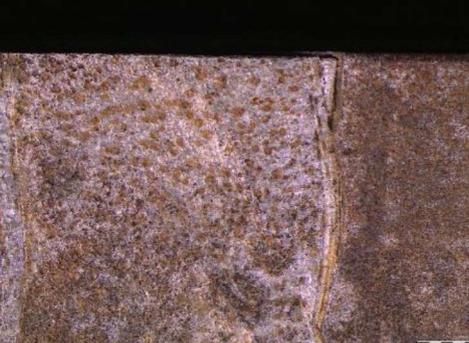
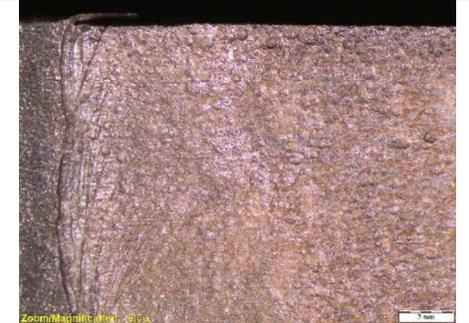
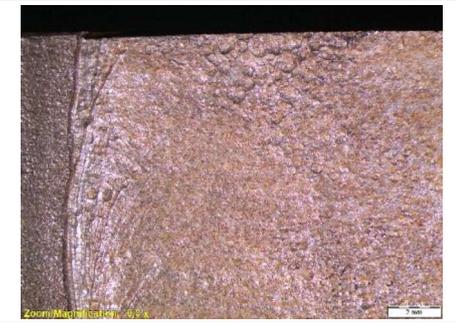
RESULTADOS DEL PROCESO DE CORROSION

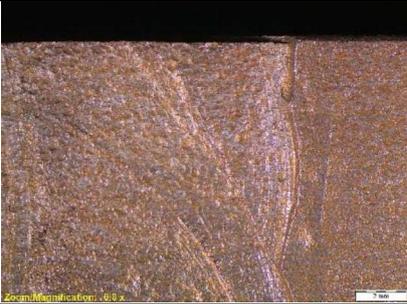
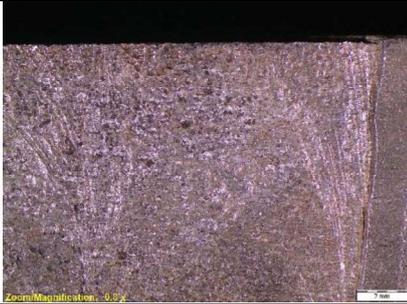
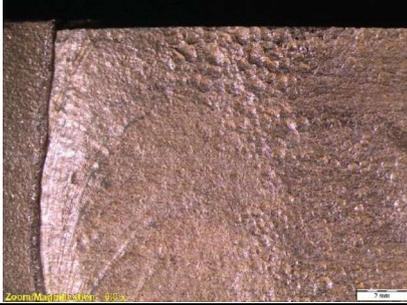
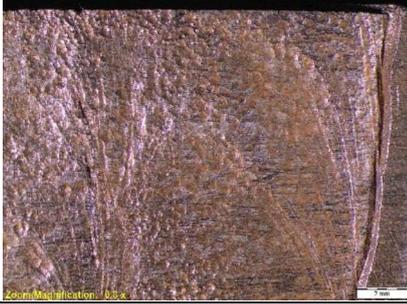
Macrográficas de las probetas ST lado A para los 3, 6 y 9 días de inmersión.

Tiempo	Probetas			
3 Dias	ST1		ST2	
				
	Presencia de algunas picaduras, de forma circular y ovaladas, y manchas de color café (óxido de hierro).		Algunas picaduras de forma circular, además de óxido de hierro como manchas de color café.	
	Aumento	8X	Aumento	8X
	ST3		ST4	
				
Presencia de picaduras de forma ovalada y circular en la zona del filo de la probeta adicional manchas cafés (óxido de hierro)		Algunas picaduras de forma circular, además de óxido de hierro como manchas de color café.		
Aumento	8X	Aumento	8X	
6 Dias	ST1		ST2	
				
	Presencia de varias picaduras con forma circular y ovaladas, también hay presencia manchas de color café (óxido de hierro).		Las picaduras han aumentado en cantidad, presentando formas circulares, no hay manchas de color café efecto de la limpieza.	
	Aumento	8X	Aumento	8X

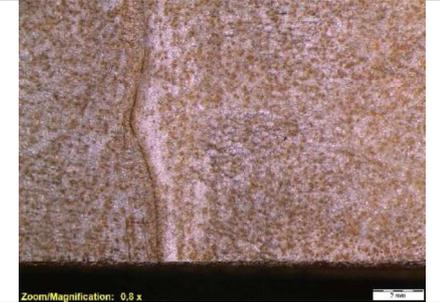
	ST3		ST4		
					
		Hay considerable presencia de picaduras en los fillos de la probeta, estas se agrandan uniéndose con otras.		Presencia de manchas color café (óxido de hierro), aumento de la cantidad de picaduras mismas que se unen con otras.	
Aumento		8X	Aumento		8X
9 Dias	ST1		ST2		
					
	El número de picaduras aumento en comparación al anterior y estas picaduras se unieron entre sí, extendiendo la corrosión a lo largo de todo el cordón, algunas picaduras con forma circular, también hay presencia manchas de color café (óxido de hierro)		El número de picaduras aumento en el filo como en todo el cordón de la probeta, las picaduras se unieron entre sí, también hay presencia manchas de color café (óxido de hierro)		
	Aumento		8X	Aumento	
ST3		ST4			
					
El número de picaduras se concentran en el filo de la probeta pero también se extendieron en todo el cordón ya que se unieron entre sí, también hay presencia manchas de color café (óxido de hierro)		El número de picaduras aumento en comparación al anterior y estas picaduras se unieron entre sí, extendiendo la corrosión a lo largo de todo el cordón, algunas picaduras con forma circular, también hay presencia manchas de color café (óxido de hierro)			
Aumento		8X	Aumento		8X

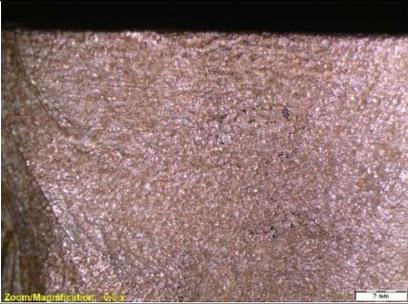
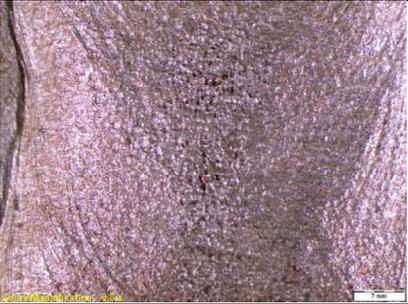
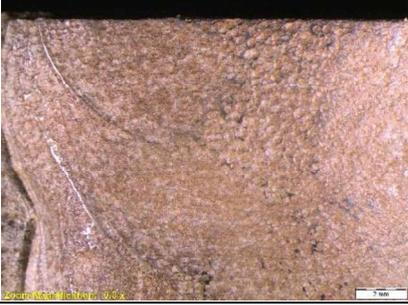
Macrografías de las probetas TA lado A para los 3, 6 y 9 días de inmersión.

Tiempo	Probetas			
3 Días	TA1		TA2	
				
	<p>Algunas picaduras de forma circular, además de óxido de hierro como manchas de color café.</p>		<p>Presencia de picaduras de forma ovalada y circular en la zona del filo de la probeta adicional manchas cafés (óxido de hierro)</p>	
	Aumento	8X	Aumento	8X
3 Días	TA3		TA4	
				
	<p>Presencia de picaduras de forma ovalada y circular en la zona del filo de la probeta adicional manchas cafés (óxido de hierro)</p>		<p>Algunas picaduras de forma circular, además de óxido de hierro como manchas de color café.</p>	
	Aumento	8X	Aumento	8X
6 Días	TA1		TA2	
				
<p>Presencia de varias picaduras, picaduras con forma circular y ovaladas, también hay presencia manchas de color café (óxido de hierro).</p>		<p>Las picaduras han aumentado en cantidad, presentando formas circulares y ovaladas, no hay manchas de color café efecto de la limpieza.</p>		
Aumento	8X	Aumento	8X	

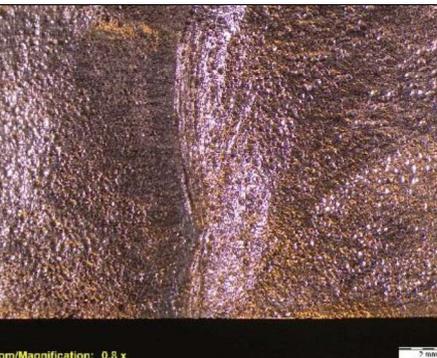
	TA3		TA4			
						
		Hay considerable presencia de picaduras en los fillos de la probeta, estas se agrandan uniéndose con otras.		Presencia de manchas color café (óxido de hierro), aumento de la cantidad de picaduras mismas que se unen con otras.		
		Aumento		8X		
9 Dias	TA1		TA2			
						
			El número de picaduras aumento en comparación al anterior y estas picaduras se unieron entre sí, extendiendo la corrosión a lo largo de todo el cordón, algunas picaduras con forma circular, también hay presencia manchas de color café (óxido de hierro)		El número de picaduras aumento en el filo como en todo el cordón de la probeta, las picaduras se unieron entre sí, también hay presencia manchas de color café (óxido de hierro)	
			Aumento		8X	
	TA3		TA4			
						
		El número de picaduras se concentran en el filo de la probeta pero también se extendieron en todo el cordón ya que se unieron entre sí, también hay presencia manchas de color café (óxido de hierro)		El número de picaduras aumento en comparación al anterior y estas picaduras se unieron entre sí, extendiendo la corrosión a lo largo de todo el cordón, algunas picaduras con forma circular, también hay presencia manchas de color café (óxido de hierro)		
		Aumento		8X		

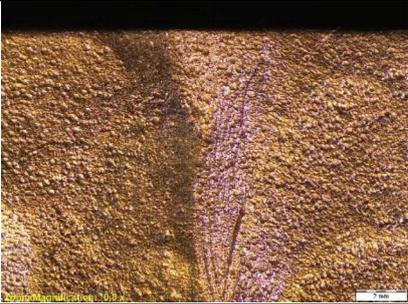
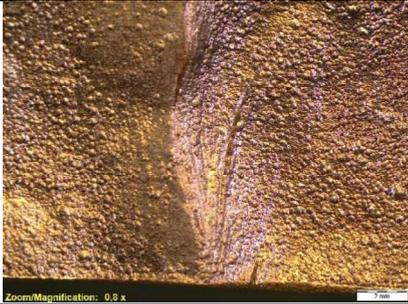
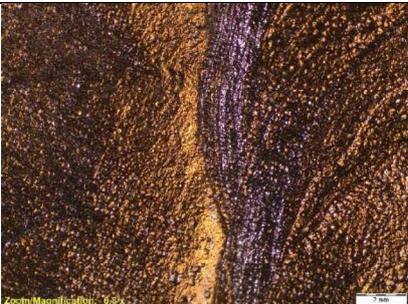
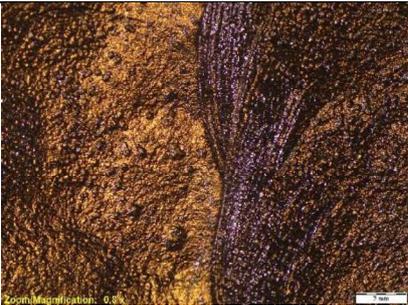
Macrografías de las probetas TR lado A para los 3, 6 y 9 días de inmersión.

Tiempo	Probetas			
3 Dias	TR1		TR2	
				
	Presencia de algunas picaduras, de forma circular y ovaladas, y manchas de color café (óxido de hierro).		Algunas picaduras de forma circular, además de óxido de hierro como manchas de color café.	
	Aumento	8X	Aumento	8X
	TR3		TR4	
				
Presencia de picaduras de forma ovalada y circular en la zona del filo de la probeta adicional manchas cafés (óxido de hierro)		Algunas picaduras de forma circular, además de óxido de hierro como manchas de color café.		
Aumento	8X	Aumento	8X	
6 Dias	TR1		TR2	
				
	Presencia de varias picaduras, picaduras con forma circular y ovaladas, también hay presencia manchas de color café (óxido de hierro).		Las picaduras han aumentado en cantidad, presentando formas circulares y ovaladas, no hay manchas de color café efecto de la limpieza.	
	Aumento	8X	Aumento	8X

9 Días	TR3		TR4	
				
	Hay considerable presencia de picaduras en los fillos de la probeta, estas se agrandan uniéndose con otras.		Presencia de manchas color café (óxido de hierro), aumento de la cantidad de picaduras mismas que se unen con otras.	
	Aumento	8X	Aumento	8X
	TR1		TR2	
				
El número de picaduras aumento en comparación al anterior y estas picaduras se unieron entre sí, extendiendo la corrosión a lo largo de todo el cordón, algunas picaduras con forma circular, también hay presencia manchas de color café (óxido de hierro)		El número de picaduras aumento en el filo como en todo el cordón de la probeta, las picaduras se unieron entre sí, también hay presencia manchas de color café (óxido de hierro)		
Aumento	8X	Aumento	8X	
TR3		TR4		
				
El número de picaduras se concentran en el filo de la probeta pero también se extendieron en todo el cordón ya que se unieron entre sí, también hay presencia manchas de color café (óxido de hierro)		El número de picaduras aumento en comparación al anterior y estas picaduras se unieron entre sí, extendiendo la corrosión a lo largo de todo el cordón, algunas picaduras con forma circular, también hay presencia manchas de color café (óxido de hierro)		
Aumento	8X	Aumento	8X	

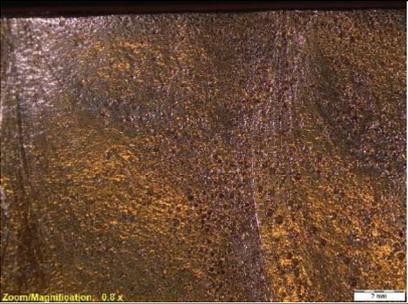
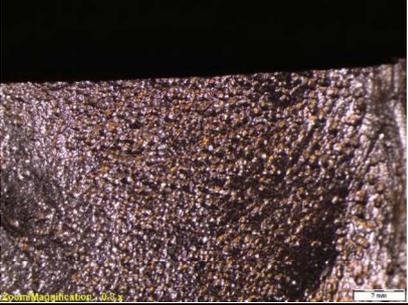
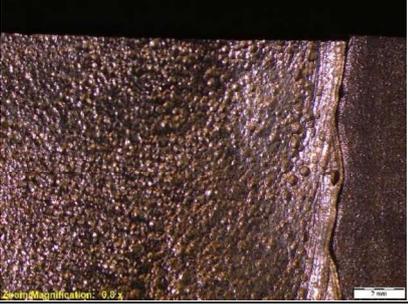
Macrografías de las probetas ST lado B para los 3, 6 y 9 días de inmersión.

Tiempo	Probetas			
3 Días	ST1		ST2	
				
	Presencia de algunas picaduras, de forma circular y ovaladas, y manchas de color café (óxido de hierro).		Algunas picaduras de forma circular, además de óxido de hierro como manchas de color café.	
	Aumento	8X	Aumento	8X
	ST3		ST4	
				
Presencia de picaduras de forma ovalada y circular en la zona del filo de la probeta adicional manchas cafés (óxido de hierro)		Algunas picaduras de forma circular, además de óxido de hierro como manchas de color café.		
Aumento	8X	Aumento	8X	
6 Días	ST1		ST2	
				
Presencia de varias picaduras, picaduras con forma circular y ovaladas, también hay presencia manchas de color café (óxido de hierro).		Las picaduras han aumentado en cantidad, presentando formas circulares y ovaladas, no hay manchas de color café efecto de la limpieza.		
Aumento	8X	Aumento	8X	

	ST3		ST4			
						
		Hay considerable presencia de picaduras en los fillos de la probeta, estas se agrandan uniéndose con otras.		Presencia de manchas color café (óxido de hierro), aumento de la cantidad de picaduras mismas que se unen con otras.		
Aumento		8X	Aumento		8X	
9 Días	ST1		ST2			
						
			El número de picaduras aumento en comparación al anterior y estas picaduras se unieron entre sí, extendiendo la corrosión a lo largo de todo el cordón, algunas picaduras con forma circular, también hay presencia manchas de color café (óxido de hierro)		El número de picaduras aumento en el filo como en todo el cordón de la probeta, las picaduras se unieron entre sí, también hay presencia manchas de color café (óxido de hierro)	
	Aumento		8X	Aumento		8X
	ST3		ST4			
						
		El número de picaduras se concentran en el filo de la probeta pero también se extendieron en todo el cordón ya que se unieron entre sí, también hay presencia manchas de color café (óxido de hierro)		El número de picaduras aumento en comparación al anterior y estas picaduras se unieron entre sí, extendiendo la corrosión a lo largo de todo el cordón, algunas picaduras con forma circular, también hay presencia manchas de color café (óxido de hierro)		
Aumento		8X	Aumento		8X	

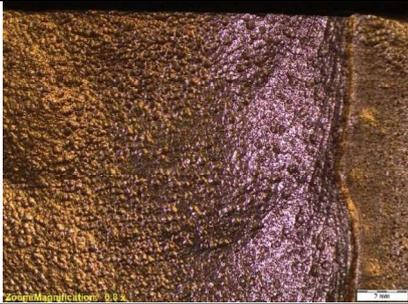
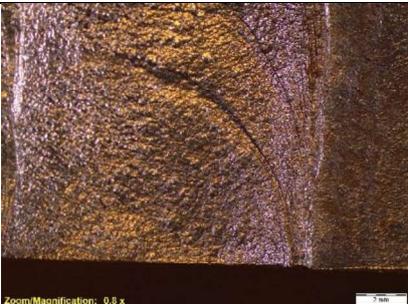
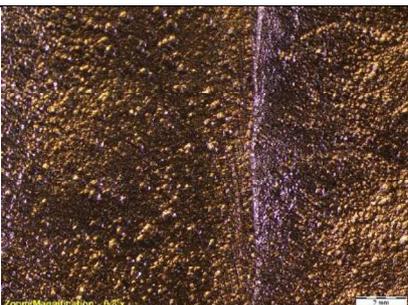
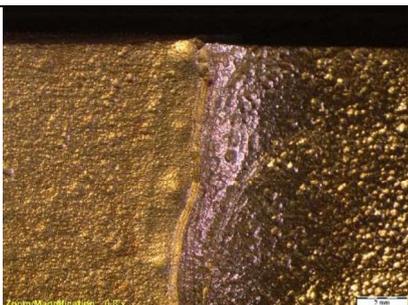
Macrografías de las probetas TA lado B para los 3, 6 y 9 días de inmersión.

Tiempo	Probetas			
3 Días	TA1		TA2	
				
	Presencia de algunas picaduras, de forma circular y ovaladas, y manchas de color café (óxido de hierro).		Algunas picaduras de forma circular, además de óxido de hierro como manchas de color café.	
	Aumento		Aumento	
	8X		8X	
	TA3		TA4	
				
Presencia de picaduras de forma ovalada y circular en la zona del filo de la probeta adicional manchas cafés (óxido de hierro)		Algunas picaduras de forma circular, además de óxido de hierro como manchas de color café.		
Aumento		Aumento		
8X		8X		
6 Días	TA1		TA2	
				
	Presencia de varias picaduras, picaduras con forma circular y ovaladas, también hay presencia manchas de color café (óxido de hierro).		Las picaduras han aumentado en cantidad, presentando formas circulares y ovaladas, no hay manchas de color café efecto de la limpieza.	
	Aumento		Aumento	
8X		8X		

	TA3		TA4			
						
		Hay considerable presencia de picaduras en los fillos de la probeta, estas se agrandan uniéndose con otras.		Presencia de manchas color café (óxido de hierro), aumento de la cantidad de picaduras mismas que se unen con otras.		
		Aumento	8X	Aumento	8X	
9 Dias	TA1		TA2			
						
			El número de picaduras aumento en comparación al anterior y estas picaduras se unieron entre sí, extendiendo la corrosión a lo largo de todo el cordón, algunas picaduras con forma circular, también hay presencia manchas de color café (óxido de hierro)		El número de picaduras aumento en el filo como en todo el cordón de la probeta, las picaduras se unieron entre sí, también hay presencia manchas de color café (óxido de hierro)	
			Aumento	8X	Aumento	8X
	TA3		TA4			
						
		El número de picaduras se concentran en el filo de la probeta pero también se extendieron en todo el cordón ya que se unieron entre sí, también hay presencia manchas de color café (óxido de hierro)		El número de picaduras aumento en comparación al anterior y estas picaduras se unieron entre sí, extendiendo la corrosión a lo largo de todo el cordón, algunas picaduras con forma circular, también hay presencia manchas de color café (óxido de hierro)		
		Aumento	8X	Aumento	8X	

Macrografías de las probetas TR lado B para los 3, 6 y 9 días de inmersión.

Tiempo	Probetas			
3 Días	TR1		TR2	
				
	Presencia de algunas picaduras, de forma circular y ovaladas, y manchas de color café (óxido de hierro).		Algunas picaduras de forma circular, además de óxido de hierro como manchas de color café.	
	Aumento		8X	
	TR3		TR4	
				
Presencia de picaduras de forma ovalada y circular en la zona del filo de la probeta adicional manchas cafés (óxido de hierro)		Algunas picaduras de forma circular, además de óxido de hierro como manchas de color café.		
Aumento		8X		
TR1		TR2		
6 Días				
	Presencia de varias picaduras, picaduras con forma circular y ovaladas, también hay presencia manchas de color café (óxido de hierro).		Las picaduras han aumentado en cantidad, presentando formas circulares y ovaladas, no hay manchas de color café efecto de la limpieza.	
	Aumento		8X	
Aumento		8X		

	TR3		TR4			
						
		Hay considerable presencia de picaduras en los fillos de la probeta, estas se agrandan uniéndose con otras.		Presencia de manchas color café (óxido de hierro), aumento de la cantidad de picaduras mismas que se unen con otras.		
Aumento		8X	Aumento		8X	
9 Dias	TR1		TR2			
						
			El número de picaduras aumento en comparación al anterior y estas picaduras se unieron entre sí, extendiendo la corrosión a lo largo de todo el cordón, algunas picaduras con forma circular, también hay presencia manchas de color café (óxido de hierro)		El número de picaduras aumento en el filo como en todo el cordón de la probeta, las picaduras se unieron entre sí, también hay presencia manchas de color café (óxido de hierro)	
	Aumento		8X	Aumento		8X
	TR3		TR4			
						
		El número de picaduras se concentran en el filo de la probeta pero también se extendieron en todo el cordón ya que se unieron entre sí, también hay presencia manchas de color café (óxido de hierro)		El número de picaduras aumento en comparación al anterior y estas picaduras se unieron entre sí, extendiendo la corrosión a lo largo de todo el cordón, algunas picaduras con forma circular, también hay presencia manchas de color café (óxido de hierro)		
Aumento		8X	Aumento		8X	

ANEXO VI.

GUÍA ESTÁNDAR PARA EXAMEN Y EVALUACIÓN DE CORROSIÓN POR
PICADURAS

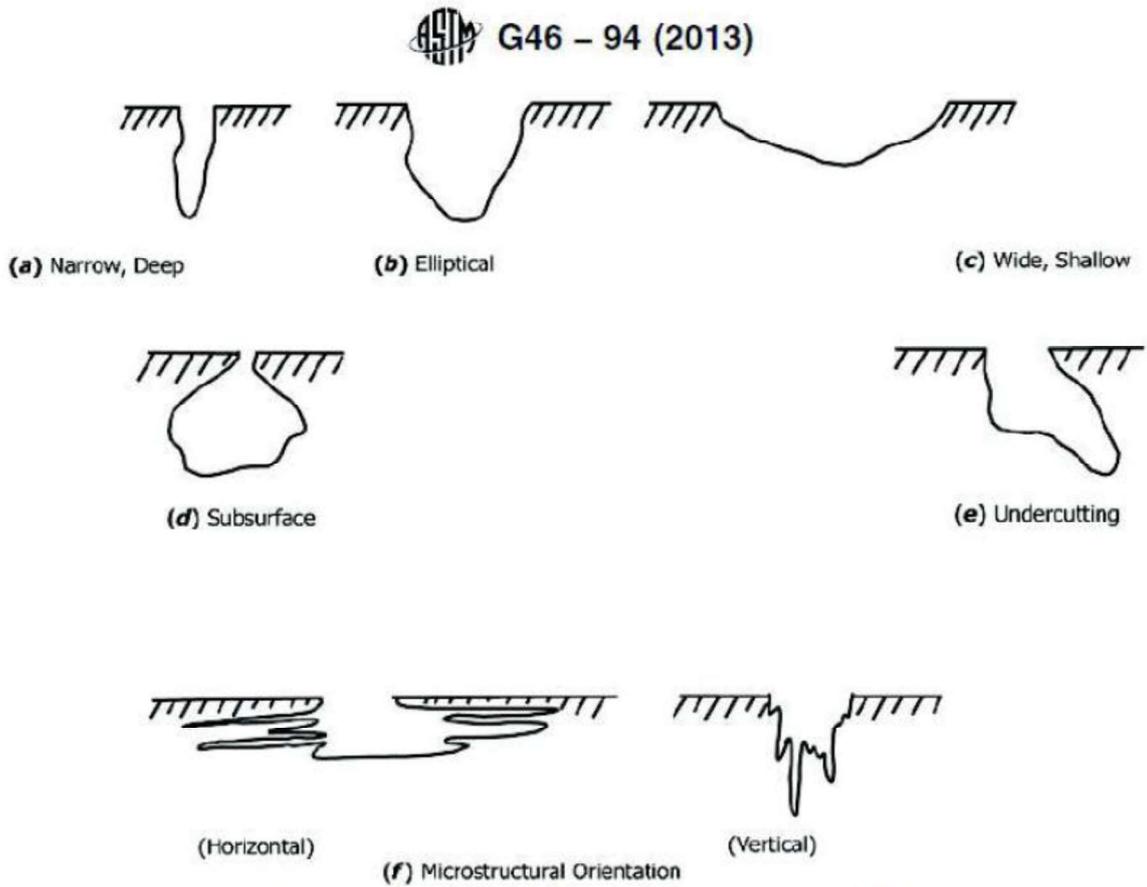


FIG. 1 Variations in the Cross-Sectional Shape of Pits

ANEXO VII.
INFORME DE ENSAYO DE DUREZAS



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
MECÁNICA



LABORATORIO DE ANÁLISIS
DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES

F01-PE-LAEV-01 Rev.00

INFORME

LAEV – M19.110

Quito, 8 de agosto de 2019

Solicitado por: M.Sc. Carlos Díaz
Persona de contacto: Jonathan LLive
Teléfono: 0984209909
Correo: jonathan.llive@epn.edu.ec
Fecha de recepción: 09/07/2019
Fecha de ejecución: 17/07/2019

ORDEN DE TRABAJO N°: N/A

1. MUESTRA: Tres (3) muestras para ensayo de barrido de dureza.

2. GENERALIDADES

La siguiente información fue proporcionada por el cliente:

Título de la tesis: ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE LA SENSIBILIDAD DE LA CORROSIÓN POR PICADURA DEL ACERO A572 SOLDADO Y TRATADO TERMICAMENTE.

En la tabla 1 se muestra la identificación de las muestras a ser ensayadas.

Tabla 1. Identificación de las muestras.

Id. Cliente	Id. LAEV
Probeta sin tratamiento térmico	M19.110.01
Probeta con tratamiento de recocido	M19.110.02
Probeta con tratamiento de revenido	M19.110.03

3. CONDICIONES AMBIENTALES:

Temperatura: $20,1 \pm 0,3^{\circ}\text{C}$

Humedad relativa: $48,7 \pm 1,1\%$

LAEV – M19.110

Página 1 de 2

Dirección: Av. Mena Caamaño e Isabel la Católica Esquina (Escuela Politécnica Nacional)
Teléfono: 022976300 ext. 3715, 3716
Correo: laev@epn.edu.ec

4. ENSAYO DE BARRIDO DE DUREZA

En la tabla 2 se muestra los resultados del ensayo de dureza de la muestra M19.110.01.

Tabla 2. Resultados de barrido de dureza de la muestra M19.110.01.

ZONA	ESCALA	MB	ZAC	MA	ZAC	MB
SUPERIO	HRB	79	-	77,5	-	79
	HRC	-	16	-	15	-
CENTRAL	HRB	82	-	-	-	83
	HRC	-	22	20	21	-
INFERIOR	HRB	82	-	79	-	82
	HRC	-	14	-	13	-

En la tabla 3 se muestra los resultados del ensayo de dureza de la muestra M19.110.02.

Tabla 3. Resultados de barrido de dureza de la muestra M19.110.02.

ZONA	ESCALA	MB	ZAC	MA	ZAC	MB
SUPERIOR	HRB	77	81	74	82	77
CENTRAL	HRB	78	88	-	89	80
	HRC	-	-	10	-	-
INFERIOR	HRB	78	83	75	83	79

En la tabla 4 se muestra los resultados del ensayo de dureza de la muestra M19.110.03.

Tabla 4. Resultados de barrido de dureza de la muestra M19.110.03.

ZONA	ESCALA	MB	ZAC	MA	ZAC	MB
SUPERIOR	HRB	80	83	72	82	78
CENTRAL	HRB	79	-	-	-	80
	HRC	-	17	15	16	-
INFERIOR	HRB	76	82	73	83	81

*MB: Material base

*ZAC: Zona afectada por el calor

*MA: Material de aporte

Nota.- Los resultados contenidos en el presente informe corresponden únicamente a las muestras ensayadas por el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones (LAEV).

	REVISADO POR:	APROBADO POR:
Firma:		
Nombre:	Ing. Jonathan Castro, M.Sc.	Ph.D. Wilson Guachamin
Cargo:	TÉCNICO DOCENTE	JEFE
LABORATORIO DE ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES		

ANEXO VIII.

TABLAS DE CONVERSIÓN DE DUREZA ESTÁNDAR PARA LA RELACIÓN DE METALES ENTRE DUREZA BRINELL, DUREZA VICKERS, DUREZA ROCKWELL, DUREZA SUPERFICIAL, DUREZA KNOOP Y DUREZA ESCLEROSCÓPICA

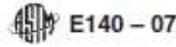


TABLE 1 Approximate Hardness Conversion Numbers for Non-Austenitic Steels (Rockwell C Hardness Range)^{A, B}

Rockwell C Hardness Number 150 kgf (HRC)	Vickers Hardness Number (HV)	Brinell Hardness Number ^C		Knoop Hardness, Number 500-gf and Over (HK)	Rockwell Hardness Number		Rockwell Superficial Hardness Number			Scleroscope Hardness Number ^D	Rockwell C Hardness Number 150 kgf (HRC)
		10-mm Standard Ball, 3000-kgf (HBS)	10-mm Carbide Ball, 3000-kgf (HBW)		A Scale, 60-kgf (HRA)	D Scale, 100-kgf (HRD)	15-N Scale, 15-kgf (HR 15-N)	30-N Scale, 30-kgf (HR 30-N)	45-N Scale, 45-kgf (HR 45-N)		
68	940	—	—	920	85.6	76.9	93.2	84.4	75.4	97.3	68
67	900	—	—	895	85.0	76.1	92.9	83.6	74.2	95.0	67
66	885	—	—	870	84.5	75.4	92.5	82.8	73.3	92.7	66
65	832	—	(739)	846	83.9	74.5	92.2	81.9	72.0	90.6	65
64	800	—	(722)	822	83.4	73.8	91.8	81.1	71.0	88.5	64
63	772	—	(705)	799	82.8	73.0	91.4	80.1	69.9	86.5	63
62	746	—	(688)	776	82.3	72.2	91.1	79.3	68.8	84.5	62
61	720	—	(670)	754	81.8	71.5	90.7	78.4	67.7	82.6	61
60	697	—	(654)	732	81.2	70.7	90.2	77.5	66.6	80.8	60
59	674	—	634	710	80.7	69.9	89.8	76.6	65.5	79.0	59
58	653	—	615	690	80.1	69.2	89.3	75.7	64.3	77.3	58
57	633	—	595	670	79.6	69.5	88.9	74.8	63.2	75.6	57
56	613	—	577	650	79.0	67.7	88.3	73.9	62.0	74.0	56
55	595	—	560	630	78.5	66.9	87.9	73.0	60.9	72.4	55
54	577	—	543	612	78.0	66.1	87.4	72.0	59.8	70.9	54
53	560	—	525	594	77.4	65.4	86.9	71.2	58.6	69.4	53
52	544	(500)	512	576	76.8	64.6	86.4	70.2	57.4	67.9	52
51	528	(487)	496	558	76.3	63.8	85.9	69.4	56.1	66.5	51
50	513	(475)	481	542	75.9	63.1	85.5	68.5	55.0	65.1	50
49	498	(464)	469	526	75.2	62.1	85.0	67.6	53.8	63.7	49
48	484	451	455	510	74.7	61.4	84.5	66.7	52.5	62.4	48
47	471	442	443	495	74.1	60.8	83.9	65.8	51.4	61.1	47
46	458	432	432	480	73.6	60.0	83.5	64.8	50.3	59.8	46
45	446	421	421	468	73.1	59.2	83.0	64.0	49.0	58.5	45
44	434	409	409	452	72.5	58.5	82.5	63.1	47.8	57.3	44
43	423	400	400	438	72.0	57.7	82.0	62.2	46.7	56.1	43
42	412	390	390	426	71.5	56.9	81.5	61.3	45.5	54.9	42
41	402	381	381	414	70.9	56.2	80.9	60.4	44.3	53.7	41
40	392	371	371	402	70.4	55.4	80.4	59.5	43.1	52.6	40
39	382	362	362	391	69.9	54.6	79.9	58.6	41.9	51.5	39
38	372	353	353	380	69.4	53.8	79.4	57.7	40.8	50.4	38
37	363	344	344	370	68.9	53.1	78.8	56.8	39.6	49.3	37
36	354	336	336	360	68.4	52.3	78.3	55.9	38.4	48.2	36
35	345	327	327	351	67.9	51.5	77.7	55.0	37.2	47.1	35
34	336	319	319	342	67.4	50.8	77.2	54.2	36.1	46.1	34
33	327	311	311	334	66.8	50.0	76.6	53.3	34.9	45.1	33
32	318	301	301	326	66.3	49.2	76.1	52.1	33.7	44.1	32
31	310	294	294	318	65.8	48.4	75.6	51.3	32.5	43.1	31
30	302	286	286	311	65.3	47.7	75.0	50.4	31.3	42.2	30
29	294	279	279	304	64.8	47.0	74.5	49.5	30.1	41.3	29
28	286	271	271	297	64.3	46.1	73.9	48.6	28.9	40.4	28
27	279	264	264	290	63.8	45.2	73.3	47.7	27.8	39.5	27
26	272	258	258	284	63.3	44.6	72.8	46.8	26.7	38.7	26
25	266	253	253	278	62.8	43.8	72.2	45.9	25.5	37.8	25
24	260	247	247	272	62.4	43.1	71.6	45.0	24.3	37.0	24
23	254	243	243	266	62.0	42.1	71.0	44.0	23.1	36.3	23
22	248	237	237	261	61.5	41.6	70.5	43.2	22.0	35.5	22
21	243	231	231	256	61.0	40.9	69.9	42.3	20.7	34.8	21
20	238	226	226	251	60.5	40.1	69.4	41.5	19.6	34.2	20

^A In the table headings, force refers to total test forces.
^B Appendix X1 contains equations converting determined hardness scale numbers to Rockwell C hardness numbers for non-austenitic steels. Refer to 1.11 before using conversion equations.
^C The Brinell hardness numbers in parentheses are outside the range recommended for Brinell hardness testing in 9.1 of Test Method E10.
^D These Scleroscope hardness conversions are based on Vickers—Scleroscope hardness relationships developed from Vickers hardness data provided by the National Bureau of Standards for 13 steel reference blocks, Scleroscope hardness values obtained on these blocks by the Shore Instrument and Mfg. Co., Inc., the Roll Manufacturers Institute, and members of this Institute, and also on hardness conversions previously published by the American Society for Metals and the Roll Manufacturers Institute.

ANEXO IX.

3.2.4.1 Resultados del ensayo para probetas sin tratamiento térmico (ST)

En la tabla 3.11, se muestra los resultados del ensayo de dureza realizado a las probetas que no se realizó el tratamiento térmico.

Tabla 3.11. Resultados del ensayo de dureza para probetas sin tratamiento térmico.

Zona	Barrido Superior			Barrido Central			Barrido Inferior		
	HRB	HRC	HB	HRB	HRC	HB	HRB	HRC	HB
MB	82	-	156	82	-	156	86	-	169
ZAC	-	22,5	239	-	21	231	-	18	214
MA	86,5	-	170,5	-	20,5	228	89	-	180
ZAC	-	17,5	212	-	22	236	-	16	204
MB	82	-	156	84	-	162	85	-	165

(Fuente: Propia)

3.2.4.2 Resultados del ensayo para probetas con tratamiento térmico (T1, T2)

En las tablas 3.12 y 3.13 se muestran los resultados de los ensayos realizados a las probetas con tratamiento térmico.

Tabla 3.12. Resultados del ensayo de dureza para probetas con tratamiento térmico (T1).

Zona-T1	Barrido Superior			Barrido Central			Barrido Inferior		
	HRB	HRC	HB	HRB	HRC	HB	HRB	HRC	HB
MB	80	-	150	78,5	-	145,5	81	-	153
ZAC	85	-	165	89	-	180	86	-	169
MA	84	-	162	-	10	173	85	-	165
ZAC	86	-	169	88	-	176	87	-	172
MB	80	-	150	80	-	150	81,5	-	154,5

(Fuente: Propia)

Tabla 3.13. Resultados del ensayo de dureza para probetas con tratamiento térmico (T2).

Zona-T2	Barrido Superior			Barrido Central			Barrido Inferior		
	HRB	HRC	HB	HRB	HRC	HB	HRB	HRC	HB
MB	87	-	172	79	-	147	81	-	153
ZAC	-	11	178	-	16	204	-	13	186
MA	86,5	-	169,5	-	15	199	88	-	176
ZAC	-	12	183	-	16	204	-	11	178
MB	83	-	159	81	-	153	88	-	176

(Fuente: Propia)

ANEXO XI
ESTRUTURAS METÁLICAS

TEXTURAS COM DENOMINAÇÕES PARTICULARES

181

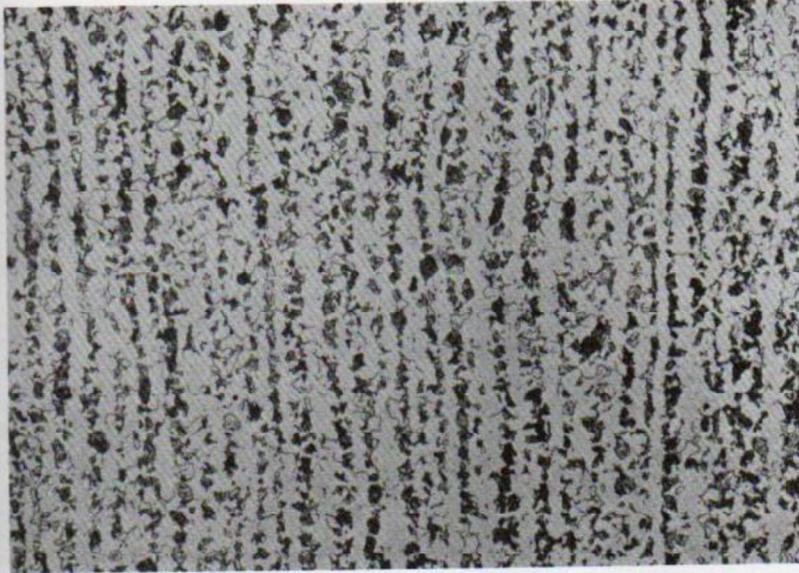


Fig. 317 — Aço doce laminado e recozido apresentando uma textura alinhada. A ferrita e a perlita se dispõem em estrias contínuas. Ataque: nítrico. 150 x.

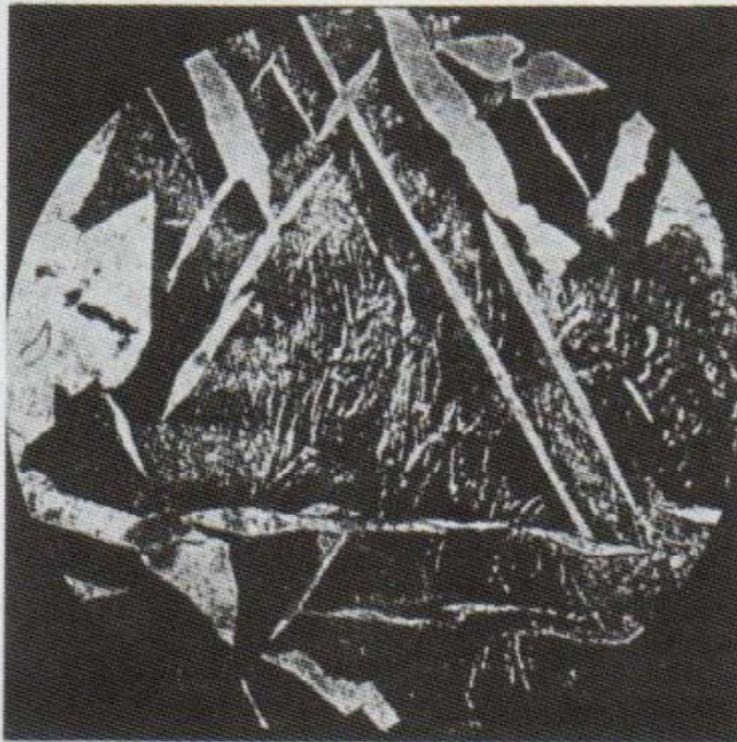


Fig. 336 — Aço meio duro com textura acicular ou de Widmanstätten. Observa-se neste caso a disposição triangular das agulhas de ferrita. Ataque pelo reativo de água régia. 200 x.

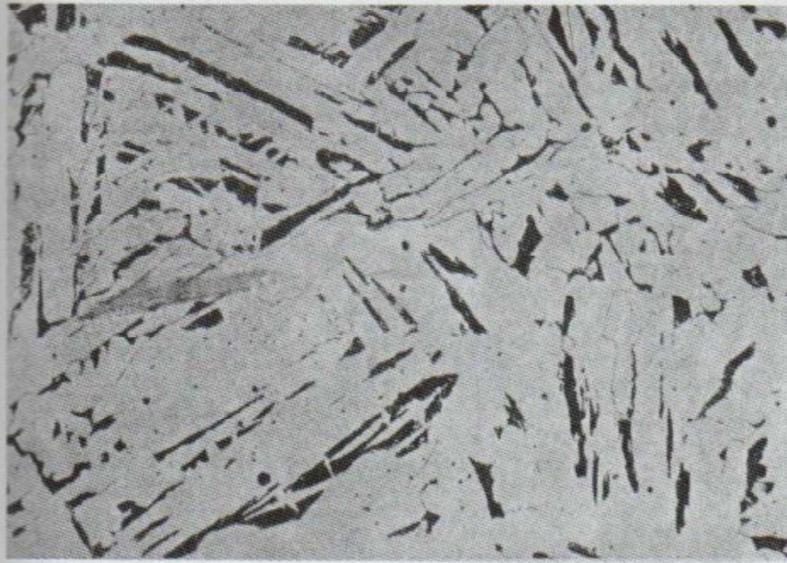


Fig. 337 — Textura acicular em aço doce. A perlita que se forma entre as agulhas de ferrita fica também com aspecto acicular. Ataque: nítrico. 150 x.