



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESTUDIO DEL EFECTO CORROSIVO EN JUNTAS SOLDADAS DE ACERO API 5L X56 SOMETIDAS A TENSIÓN E INMERSAS EN SOLUCIÓN DE CLORURO FÉRRICO PARA PROCESOS SMAW Y GTAW-SMAW

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO

CATOTA ÑACATA BRYAN ALONSO
bryan.catota@epn.edu.ec

MAJIN QUIJIA EVELIN PATRICIA
evelin.majin@epn.edu.ec

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

CODIRECTOR: Ing. BARRAGÁN CAMPOS GALO HOMERO, M.Sc.
homero.barragan@epn.edu.ec

Quito, marzo 2022

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **Catota Ñacata Bryan Alonso** y **Majin Quijia Evelin Patricia**, bajo mi supervisión.

Ing. Carlos Díaz, M.Sc.

DIRECTOR DE PROYECTO

Ing. Homero Barragán, M.Sc.

CODIRECTOR DE PROYECTO

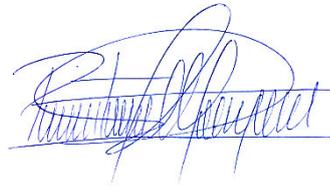
DECLARACIÓN

Nosotros, Catota Ñacata Bryan Alonso y Majin Quijia Evelin Patricia, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

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



Catota Ñacata Bryan Alonso



Majin Quijia Evelin Patricia

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a Dios por siempre estar a mi lado y haberme dado el mejor regalo del mundo, a mi padre Galo y mi madre Gladys quienes han sido mi guía, mi ejemplo, mi apoyo incondicional y los pilares de mi existencia, a mis queridos hermanos Roger y Kerlly, a mis abuelitos paternos Juanito y Lolita por todo el cariño y tantos bonitos recuerdos, a mis abuelitos maternos Carlitos y Beatriz que ahora me cuidan desde el cielo no saben cuanta falta me hacen y cuánto los quiero. A Rodrigo y Silvia mis padrinos, finalmente a toda mi familia de sangre y a mi familia de la universidad.

Bryan A. Catota Ñ.

DEDICATORIA

A Dios, cuyos planes y caminos me han permitido llegar a este punto para que demuestre de lo que soy capaz.

A mi abuelita, María Juana Bautista, te lo prometí y aquí estoy lográndolo, tú recuerdo fue la motivación para alcanzar mis metas.

A mi madre, Luz María Quijía que desde pequeña me motivo a superarme y cuyo apoyo incondicional estuvo presente en cada paso que he dado.

A mi padre, Segundo César Majin que ha estado pendiente de mis pasos.

A mi familia, Giovanny, Cristian, Yajaira, Yulissa, Aracely y Fátima que siempre han estado prestos para ayudarme, por su preocupación diaria y su motivación constante.

Evelin Majin Q.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por guiar mi camino, por cuidarme, por haberme ayudado a terminar mi carrera y sobre todo por darme una maravillosa familia.

A mis progenitores por enseñarme a amar, creer y respetar a Dios, gracias por haberme inculcado valores desde pequeño, por enseñarme la importancia del trabajo y por ser un vivo ejemplo de amor y solidaridad, a mi madre Gladisita gracias por confiar en mí incondicionalmente usted fue ese impulso que me reconfortaba cuando más lo necesitaba, a mi padre Galito gracias por todo, por haber hecho esta meta posible, hoy termina una etapa de mi vida y les recompensare todos los sacrificios que han hecho por mí.

A mis hermanos Roger y Kerlly que son incondicionales y puedo confiar en ellos no solo como mis hermanos sino como mis mejores amigos.

A mis abuelitos Juanito, Lolita, Carlitos les agradezco infinitamente todo el cariño, la generosidad, las atenciones y siempre admirare ese espíritu de lucha ya que han construido todo desde cero y ahora sus nietos empiezan a terminar sus estudios universitarios me hubiese encantado abuelito Carlitos que pueda ver este sueño cumplido, a mi abuelita Beatriz, aunque no pude conocerla sé que siempre me ha cuidado desde el cielo.

A los docentes y técnicos del Laboratorio De Desgaste Y Falla y Laboratorio De Soldadura de la Escuela Politécnica Nacional en especial al ing. Gabriel Velastegui, gracias por su aporte en el desarrollo de este trabajo de titulación.

A todos mis tíos, tías, padrinos, primos, primas que siempre me han brindado un consejo, que han estado ahí para mí con un abrazo o unas palabras de aliento.

A mis babacos amigos y amigas con quienes he compartido muchas anécdotas desde el prepo se les agrádese esa amistad que va perdurando con los años.

Bryan A. Catota Ñ.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por todo lo que tuve, por todo lo que tengo y todo lo que tendré.

A mi madre, por todas las dificultades que pasaste para que pudiera alcanzar mis metas y por todas las lecciones para que sea una buena persona con un corazón gentil dispuesta a ayudar a otros.

A mi padre, por el apoyo y motivación para culminar mis estudios y su esfuerzo para verme culminar mi carrera.

A mi familia, Giovanny, Cristian, Aracely y Fátima, por todo el cariño que me han entregado, ustedes han marcado mi vida, gracias por estar presente.

A mis hermanas, Yajaira y Yulissa, por su manera tan extraña de darme cariño y ser mi apoyo, por todas las risas y juegos compartidos desde pequeñas hasta ahora, no hubiera podido pedir mejores hermanas que ustedes dos.

A mis amigos, Isa, Silvi, David, Wlady, Kelvin, Xavi y Tiago, por escucharme y ser mi apoyo cada vez que lo necesitaba, por compartir junto a mí tantos momentos espero que sean felices donde estén y que alcancen sus sueños.

A Diego, que si no lo incluía aquí, no me iba a incluir en su tesis, por tu apoyo y comprensión te estaré agradecida siempre.

Evelin Majin Q.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN	1
DECLARACIÓN	2
DEDICATORIA	3
AGRADECIMIENTO.....	5
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	7
RESUMEN	13
ABSTRACT	14
INTRODUCCIÓN	15
Objetivo General	16
Objetivos específicos	16
1. MARCO TEÓRICO.....	17
1.1. Acero.....	17
1.1.1. Diagrama de fase	17
1.1.2. Diagrama hierro- carbono.....	18
1.1.3. Tubería API 5L X56.....	19
1.2. Soldadura	20
1.2.1. Soldadura SMAW	21
1.2.2. Soldadura GTAW	25
1.3. Corrosión.....	28
1.3.1. Corrosión.....	28
1.3.2. Tipos de Corrosión	29
1.3.3. Pruebas de Corrosión.....	31
1.3.4. Cálculo de la tasa de corrosión	32
1.3.5. Agente Corrosivo.....	33
2. METODOLOGÍA.....	34
2.1. Caracterización del metal base	34
2.1.1. Ensayos mecánicos.....	35
2.1.2. Ensayos Químicos.....	37
2.1.3. Ensayos metalográficos	37
2.2. Procedimientos de Soldadura de la Tubería API 5L X56	38
2.2.1. Preparación de la junta soldada.	38
2.2.2. Carbono equivalente y temperatura de precalentamiento	39
2.2.3. Especificaciones del equipo de soldadura.....	40
2.2.4. Soldadura SMAW con electrodos E7010 y E7018	41
2.2.5. Soldadura GTAW- SMAW con material de aporte ER80S y electrodo E7018	42
2.3. Ensayos de Calificación de Procedimiento.....	43
2.3.1. Ensayos de resistencia a la tracción	45
2.3.2. Ensayos de Nick-Break	45

2.3.2.1. Procedimiento para ensayo Nick-Break	46
2.3.3. Ensayos de doblado de raíz	46
2.3.3.1. Procedimiento para ensayo de doblado de raíz	47
2.3.4. Ensayos de doblado de cara	47
2.4. Ensayo de corrosión por inmersión de cloruro férrico	48
2.4.1. Preparación de la solución	48
2.4.2. Preparación de las probetas.....	50
2.4.3. Procedimiento para medición de masa	51
2.4.4. Procedimiento para el cálculo de la tasa de corrosión	53
2.4.5. Ensayo Macrográfico.....	55
2.4.6. Ensayo Micrográfico	55
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	56
3.1. Resultados	56
3.1.1. Caracterización del material base	56
3.1.2. Procedimiento de soldadura SMAW-SMAW	62
3.1.3. Procedimiento de soldadura GTAW-SMAW.....	69
3.1.4. Ensayo de corrosión.....	77
3.2. Discusión.....	97
3.2.1. Caracterización del material base	97
3.2.2. Soldadura	98
3.2.3. Corrosión.....	101
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	104
4.1. Conclusiones.....	104
4.2. Recomendaciones.....	105
Referencias Bibliográficas	106
ANEXOS	108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Características químicas y mecánicas de la tubería API 5l x56 PSL 2.....	19
Tabla 1.2. Especificaciones AWS para electrodos cubiertos.....	23
Tabla 1.3. Características y especificaciones para electrodo E7010-A1	24
Tabla 1.4. Características y especificaciones para electrodo E7018	25
Tabla 1.5. Características y especificaciones para el material de aporte ER80S-B2.....	27
Tabla 1.6. Valores de constante K para la tasa de corrosión.....	33
Tabla 2.1. Características de la Máquina Universal para el ensayo de tracción	36
Tabla 2.2. Especificaciones equipo de soldadura.	41
Tabla 2.3. Tipo y número de probetas para ensayo de calificación de procedimiento.	43
Tabla 2.4. Características de componentes empleadas para solución corrosiva.	49
Tabla 2.5. Características de la balanza empleada en ensayo de corrosión.	49
Tabla 2.6. Características del termohigrómetro.....	52
Tabla 2.7. Características del medidor de pH.	52
Tabla 2.8. Nomenclatura de las probetas de ensayo de corrosión.....	54
Tabla 3.1. Resultados del ensayo de tracción.....	56
Tabla 3.2-a. Resultados cualitativos para límite de fluencia de las probetas M20.079.13	58
Tabla 3.2-b. Resultados cualitativos para resistencia a la tracción de las probetas M20.079.13...58	
Tabla 3.3-a Resultados del ensayo de dureza para la probeta 20-051-MB-01-T	58
Tabla 3.3-b Resultados del ensayo de dureza para la probeta 20-051-MB-02-L	59
Tabla 3.4 Resultados del análisis por espectrometría por chispa para la muestra M1.....	59
Tabla 3.5. Datos cualitativos del ensayo químico bajo los requerimientos de la composición para tubería API 5L X56 grado PSL 2.	60
Tabla 3.6 Resultados del análisis metalográfico del material base.	60
Tabla 3.7. Parámetros para cada pase del procedimiento de soldadura SMAW-SMAW.....	62
Tabla 3.8. Ensayo de tracción de juntas soldadas procedimiento SMAW-SMAW.	63
Tabla 3.9. Resultados y observaciones del ensayo Nick-Break.....	63
Tabla 3.10-b. Resultados y observaciones del ensayo de doblado de raíz.....	65
Tabla 3.11. Datos de dureza obtenidos de las diferentes posiciones.....	66
Tabla 3.12. Registro fotográfico del ensayo micrográfico con aumentos X100 y X500.....	67
Tabla 3.13. Registro fotográfico del ensayo macrográfico con aumento de 0.63X.....	69
Tabla 3.14. Valores obtenidos del procedimiento de soldadura GTAW-SMAW.....	70
Tabla 3.15. Ensayo de tracción de juntas soldadas procedimiento GTAW-SMAW.....	70
Tabla 3.16. Resultados y observaciones de los ensayos Nick-Break.	71
Tabla 3.17-a. Resultados y observaciones del ensayo de doblado de cara.....	72
Tabla 3.17-b. Resultados y observaciones del ensayo de doblado de raíz.....	72
Tabla 3.18. Datos de dureza obtenidos de las diferentes posiciones.....	73
Tabla 3.19. Registro fotográfico del ensayo micrográfico con aumentos X100 y X500.....	74

Tabla 3.20. Registro fotográfico del ensayo macrográfico con aumento de 0.40X para la probeta GTAW 01 y 0.63X para la probeta GTAW 02.....	77
Tabla 3.21-a. Datos de masa de las probetas con procedimiento de soldadura SMAW-SMAW hasta 120 h.....	77
Tabla 3.21 -b. Datos de masa de las probetas con procedimiento de soldadura SMAW-SMAW de 144 h hasta 240 h.....	78
Tabla 3.22. Pérdida de masa por intervalos de exposición en probetas con procedimiento de soldadura SMAW-SMAW.	78
Tabla 3.23. Datos cualitativos obtenidos al aplicar el criterio de Chauvenet para las probetas con procedimiento SMAW-SMAW.	80
Tabla 3.24. Pérdida de masa acumulada para cada intervalo de 24 horas, durante el tiempo de ensayo (240 horas).	80
Tabla 3.25. Área de exposición de la solución corrosiva.....	81
Tabla 3.26. Tasa de corrosión de las probetas del procedimiento de soldadura SMAW-SMAW. ...	82
Tabla 3.27. Tasa de corrosión por intervalo de 24 horas, durante el tiempo de ensayo (240 horas).	82
Tabla 3.28. Datos de masa de probetas con procedimiento GTAW-SMAW hasta 120 h.....	83
Tabla 3.29. Datos de masa de probetas con procedimiento GTAW-SMAW de 144 h hasta 240 h.....	84
Tabla 3.30. Pérdida de masa por intervalos de exposición en probetas con procedimiento de soldadura GTAW-SMAW.	84
Tabla 3.31. Datos cualitativos obtenidos al aplicar el criterio de Chauvenet para las probetas con procedimiento GTAW-SMAW.....	86
Tabla 3.33. Área de exposición de la solución corrosiva.....	87
Tabla 3.34. Tasa de corrosión de las probetas del procedimiento de soldadura GTAW-SMAW.....	87
Tabla 3.35. Tasa de corrosión por intervalo de 24 horas	88
Tabla 3.36. Análisis macrográfico del ensayo de corrosión	89
Tabla 3.37. Corrosión presente en los procedimientos de soldadura.....	94
Tabla 3.38. Micrografías de la probeta 20-051 CII-02.....	95
Tabla 3.39. Micrografías de la probeta 20-051 CII-06.....	95
Tabla 3.40. Micrografías de la probeta 20-051 CI-01	96
Tabla 3.41. Micrografías de la probeta 20-051 CI-06.....	97
Tabla 3.42. Análisis de aceptación de ensayo de tracción para el procedimiento de soldadura SMAW-SMAW.....	98
Tabla 3.43. Análisis de aceptación de ensayo de tracción para el procedimiento de soldadura GTAW-SMAW.	98
Tabla 3.44. Corrosión presente en los procedimientos de soldadura.....	102
Tabla 3.44. Análisis del factor P de la T- Student para la comparación de la tasa de corrosión de las probetas ensayadas.	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Diagrama de fase Fe-Fe ₃ C.....	18
Figura 1.2. Micrografías: a) Ferrita- α (90x), b) Austenita (325x)	19
Figura 1.3. Zonas principales de junta soldada por fusión típica.....	20
Figura 1.4. Clasificación de procesos de soldadura.....	21
Figura 1.5. Circuito típico para soldadura por arco de metal protegido.....	22
Figura 1.6. Proceso de soldadura por arco de metal protegido.....	22
Figura 1.7. Nomenclatura ANSI/AWS A5.1 para electrodos de acero dulce.....	24
Figura 1.8. Esquema de funcionamiento de soldadura por arco de tungsteno y gas.....	26
Figura 1.9. Circuito típico de soldadura por arco de tungsteno y gas.....	26
Figura 1.10. Características de los tipos de corriente para soldadura GTAW.....	26
Figura 1.11. Tipos de corrosión en metales y aleaciones.....	29
Figura 2.1. Metodología	34
Figura 2.2. Disposición de las muestras para ensayos de tuberías con D>20 cm	35
Figura 2.3. Dimensiones de la probeta para el ensayo de tracción del material base.....	35
Figura 2.4. Disposición de las indentaciones para ensayo de dureza.....	36
Figura 2.5. Características dimensionales para ensayo químico.....	37
Figura 2.6. Características dimensionales para ensayo metalográfico.....	38
Figura 2.7. Secciones de tubería preparadas, alineadas, limpias y listas para el proceso de soldadura en posición 6G.....	39
Figura 2.8. a. Localización y nomenclatura de los especímenes de ensayos de soldaduras a tope para la calificación del procedimiento SMAW-SMAW.....	44
Figura 2.8. b. Localización y nomenclatura de los especímenes de ensayos de soldaduras a tope para la calificación del procedimiento GTAW-SMAW.....	44
Figura 2.9. Máquina de corte refrigerado por agua.....	45
Figura 2.10. Características dimensionales para ensayo de tracción	45
Figura 2.11. Características dimensionales para ensayo de Nick-Break	46
Figura 2.12. Características dimensionales para ensayo de doblado de cara y doblado de raíz....	46
Figura 2.13. Esquema dispositivo para Ensayo de Doblado.....	47
Figura 2.14. Esquema de la disposición de la probeta para ensayo de cara.....	48
Figura 2.15. Solución corrosiva resultante (1000 mL).....	50
Figura 2.16. a) Disposición de extracción de probetas. b) Características dimensionales para ensayo de corrosión	50
Figura 2.17. Esquema de la probeta para la toma de datos.....	51
Figura 2.18. Disposición de las probetas para ensayo de corrosión.....	51
Figura 2.19. Características dimensionales para ensayo micrográfico del ensayo de corrosión....	55
Figura 3.1. Análisis del límite de fluencia obtenido y requerido del material base.....	57
Figura 3.2. Análisis de la resistencia a la tracción del material base.....	57
Figura 3.3. Posiciones de las cuales se tomaron las medidas de dureza.....	66

Figura 3.4. Posiciones de las cuales se tomaron las medidas de dureza.	74
Figura 3.5. Pérdida de masa en probetas con procedimiento de soldadura SMAW-SMAW.	79
Figura 3.6. Pérdida de masa acumulada en probetas con procedimiento de soldadura SMAW-SMAW.	81
Figura 3.7. Tasa de corrosión en probetas con procedimiento de soldadura SMAW-SMAW.	83
Figura 3.8. Pérdida de masa en probetas con procedimiento de soldadura GTAW-SMAW.	85
Figura 3.9. Pérdida de masa acumulada en probetas con procedimiento de soldadura GTAW-SMAW.	86
Figura 3.10. Tasa de corrosión en probetas con procedimiento de soldadura GTAW-SMAW.	88
Figura 3.11. Tasa acumulada de corrosión para los procedimientos de soldadura SMAW-SMAW y GTAW-SMAW.	103

RESUMEN

El presente proyecto muestra el comportamiento de dos procedimientos de soldadura SMAW y GTAW-SMAW, en una tubería de designación API 5L X56 grado PSL 2, cuando se somete a un ambiente corrosivo por inmersión. Los procedimientos de soldadura fueron realizados para el pase de raíz con el electrodo E7010 en proceso SMAW y material de aporte ER80S en proceso GTAW y los pases de relleno para ambos procedimientos con el electrodo E7018, estos procedimientos de soldadura cumplen los criterios de aceptación y los requerimientos de la norma API 1104. Se extraen las probetas del cordón de soldadura bajo la norma ASTM G58 y se someten a un ensayo de corrosión acelerada por inmersión en cloruro férrico durante 10 intervalos de 24 horas de exposición según la norma ASTM G31, se obtiene la pérdida de masa para cada intervalo y se calcula la tasa de corrosión para cada probeta, obteniendo para el procedimiento de soldadura SMAW-SMAW una tasa de corrosión de 9.05 [mm/año] a 11.55 [mm/año] y para el procedimiento de soldadura GTAW-SMAW una tasa de corrosión de 9.28 [mm/año] a 11.01 [mm/año], concluyendo que la diferencia no es significativa entre los datos calculados.

Palabras clave: criterios de aceptación, ensayo de corrosión acelerado, tasa de corrosión.

ABSTRACT

This project shows the behavior of two welding procedures SMAW and GTAW-SMAW, in a pipe of API 5L X56 grade PSL 2 designation, when it is subjected to a corrosive environment by immersion. The welding procedures were performed for the root pass with the E7010 electrode in the SMAW process and the ER80S filler material in the GTAW process and the filling passes for both procedures with the E7018 electrode, these welding procedures meet the acceptance criteria and the requirements of the API 1104 standard. The specimens are extracted from the weld bead under the ASTM G58 standard and subjected to an accelerated corrosion test by immersion in ferric chloride during 10 intervals of 24 hours of exposure according to the ASTM G31 standard, it is obtained the loss of mass for each interval and the corrosion rate is calculated for each specimen, obtaining for the SMAW-SMAW welding procedure a corrosion rate of 9.05 [mm / year] to 11.55 [mm / year] and for the procedure of GTAW-SMAW welding a corrosion rate of 9.28 [mm / year] to 11.01 [mm / year], concluding that the difference is not significant between the calculated data.

Keywords: acceptance criteria, accelerated corrosion test, corrosion rate.

ESTUDIO DEL EFECTO CORROSIVO EN JUNTAS SOLDADAS DE ACERO API 5L X56 SOMETIDAS A TENSIÓN E INMERSAS EN SOLUCIÓN DE CLORURO FÉRRICO PARA PROCESOS SMAW Y GTAW-SMAW

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo evalúa el comportamiento a la corrosión acelerada de dos soldaduras a tope de una tubería API 5L X56 de 20" de diámetro, el primer tipo de soldadura es una combinación de electrodos E7010 para el pase de raíz y E7018 para los pases de relleno en proceso SMAW, el segundo tipo de soldadura es una combinación en la que se usa el material de aporte ER80S para el pase de raíz en proceso GTAW y el electrodo E7018 para los pases de relleno en proceso SMAW. La calificación de los procesos de soldadura se lo realizó bajo las directrices de la norma API 1104.

De estos tipos de soldadura se extrajeron las probetas del cordón de soldadura bajo la norma ASTM G58 y se sometieron a pruebas de corrosión por inmersión en solución de cloruro férrico según la norma ASTM G31 con una concentración de 160 g de cloruro férrico por cada 2000 ml de agua destilada. La limpieza y peso de las 5 probetas de cada soldadura se lo realizó en intervalos de 24 horas por 10 días, al quinto día se renovó el agente corrosivo con la misma concentración.

La velocidad de corrosión para el proceso SMAW-SMAW varía en el rango de 9.05 [mm/año] a 11.55 [mm/año] y para el proceso GTAW-SMAW varía en el rango 9.28 [mm/año] a 11.01 [mm/año] y mediante el criterio de Chauvenet se comparó las velocidades de corrosión de cada proceso de soldadura. Además, se realizó un registro fotográfico de todo el proceso de corrosión que permite evaluar y dimensionar los tipos de corrosión que se produjeron.

Se tomaron micrografías y macrografías que permitieron evaluar la superficie en contacto con el agente corrosivo, para que se observe la microestructura de cada proceso de soldadura y permita analizar la ZAC. Se conoce que la perlita está formada por cementita y ferrita, en esta combinación la cementita forma un cátodo y la ferrita un ánodo; estas a su vez forman una celda galvánica, que es el lugar por donde se desplaza la corrosión. Por lo tanto, al disponer de mayor cantidad de perlita en la ZAC y en el pase de raíz la corrosión es más agresiva en estos lugares. En el ensayo de corrosión las raíces de las probetas se encontraban bajo compresión mientras que las sobremontas se encontraban bajo cargas de tensión, esto produjo microfisuras que favorecen el desplazamiento de la corrosión.

Objetivo General

Estudiar el efecto corrosivo en juntas soldadas de acero API 5L X56 sometidas a tensión e inmersas en solución de cloruro férrico para procesos SMAW-SMAW y GTAW-SMAW.

Objetivos específicos

- Caracterizar el metal base (tubería API 5L X56) mediante la norma API 5L.
- Calificar la soldadura bajo la norma API 1104.
- Elaborar probetas estandarizadas según la norma ASTM G58, estas serán extraídas del cordón de soldadura de cada una de las combinaciones de electrodos en SMAW (E7010, E7018) y GTAW-SMAW (ER80S, E7018).
- Realizar prueba de corrosión acelerada en una solución de cloruro férrico basándose en la norma ASTM G31.
- Obtener y analizar la tasa de corrosión de cada combinación de electrodos utilizada.

1. MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se detallan las características del acero, fundamentos de corrosión y soldadura necesarias para comprender el fenómeno de corrosión en la tubería cuando se encuentra sometido a tensión y un medio corrosivo.

1.1. Acero

El acero pertenece al grupo de aleaciones ferrosas, en un sistema de hierro - carbono, cuya cantidad de carbono varía entre 0,008 % y 2,14 % en peso, según su composición química se clasifican en:

- Aceros de bajo contenido de carbono ($\%C < 0.25$).
- Aceros de medio contenido de carbono ($0.25 < \%C < 0.55$)
- Aceros de alto contenido de carbono ($0,55 < \%C < 2$)

Estos aceros presentan elementos aleantes como: el manganeso, níquel, vanadio, cromo Titanio, que para ser considerados aceros al carbono no deben superar el contenido permitido en la norma (UNE 10020:2001). Se tiene aceros de alta aleación cuando los elementos aleantes superan 5% de su porcentaje en peso y aceros de baja aleación cuando los elementos aleantes no superan el 5%. De acuerdo a las características y propiedades que se requiera obtener del acero se varía el contenido de los elementos aleantes, el contenido de pureza y condiciones de elaboración.

1.1.1. Diagrama de fase

Los diagramas de fase proporcionan información acerca del comportamiento microestructural de un sistema cuando la presión, temperatura y composición se pueden controlar. Los diagramas de fase o diagramas de equilibrio son representaciones de los estados del sistema cuándo interactúan las variables a controlar con el objetivo de comprender y entender el desarrollo de sus propiedades.

Para el estudio de aleaciones ferrosas se tiene el diagrama hierro-carbono y el diagrama hierro-carburo de hierro, para fundiciones grises donde el carbono se encuentra en estado libre y se presenta como grafito se estudian ambos diagramas, en aceros se utiliza el diagrama hierro- carburo de hierro un diagrama metaestable donde el carburo de hierro se encuentra entre 0% y 6.67% de peso, por convención se utiliza el nombre de diagrama hierro-carbono en los aceros.

1.1.2. Diagrama hierro- carbono

En este diagrama se muestran las transformaciones que sufren las aleaciones a diferentes porcentajes de contenido de carbono cuando la temperatura varía controladamente y las transformaciones se dan a una adecuada velocidad como se muestra en la figura 1.1, las microestructuras resultantes de estas transformaciones entregan información acerca de las propiedades del metal.

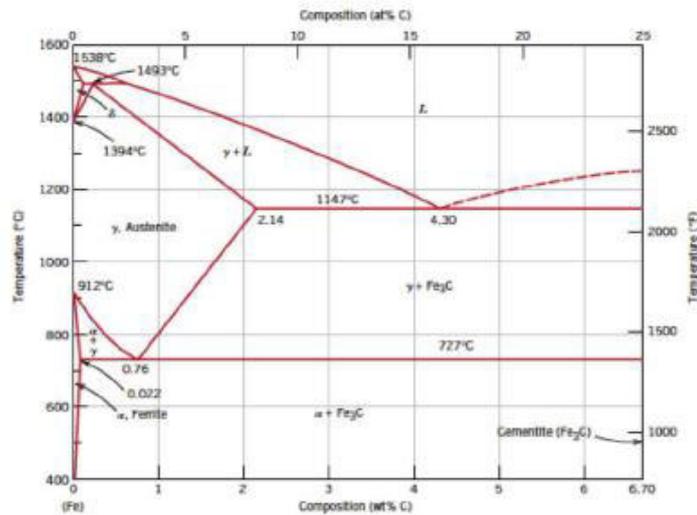


Figura 1.1. Diagrama de fase Fe-Fe₃C

(Fuente: Ciencia de materiales e Ingeniería, Callister)

En los aceros los constituyentes más simples son la ferrita, austenita y cementita, también puede presentarse combinaciones como la martensita, perlita, bainita, troostita, sorbita, ledeburita, steadita y grafito como las más comunes, sin embargo el grafito no se presenta en los aceros pero sí en fundiciones grises

- Ferrita: esta fase también es llamada hierro Alfa aquí las concentraciones de carbono son solubles como se muestra en la figura 1.2. Se caracteriza por ser un material blando.
- Austenita: Esta fase admite más concentraciones de carbono que la ferrita debido a su estructura FCC con espacios intersticiales más grandes que la estructura BCC de la ferrita. Mecánicamente la austenita es blanda y dúctil.

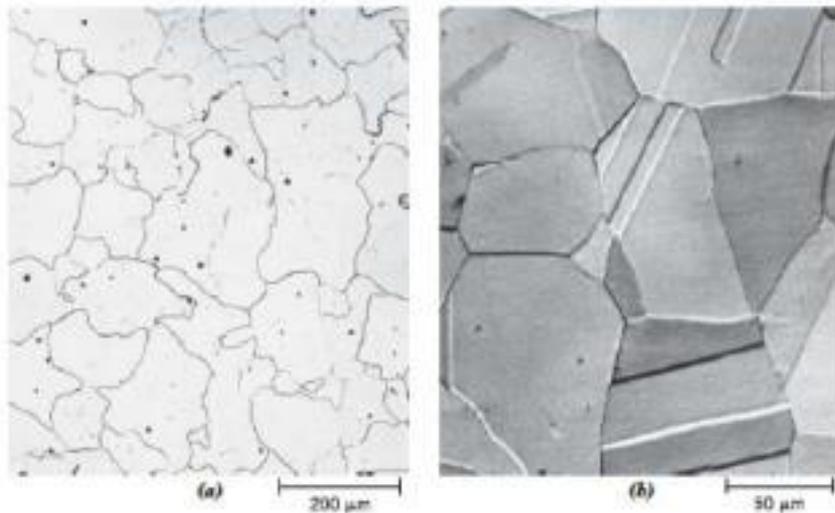


Figura 1.2. Micrografías: a) Ferrita- α (90x), b) Austenita (325x)
(Fuente: Ciencia de Materiales e Ingeniería, Callister)

- Cementita: Llamado también carburo de hierro la cementita tiene alta dureza y fragilidad, se forma cuando se sobrepasa el límite de solubilidad de carbono, su presencia mejora las propiedades mecánicas de ciertos aceros.

1.1.3. Tubería API 5L X56

Las tuberías con denominación API 5L son tuberías clasificadas por el Instituto Americano del petróleo, que se encarga de regular tubos de conducción de acero con o sin costura. El límite de fluencia mínimo de la tubería está dado por la nomenclatura X56 es decir posee 56 KSI. El grado PSL 2 corresponde al nivel de calidad, composición química y propiedades mecánicas.

La tubería a estudiar debe cumplir con las características químicas y mecánicas detalladas en la norma API 5L (2004), como se observa en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Características químicas y mecánicas de la tubería API 5L X56 PSL 2.

Requisitos químicos para análisis de calor y productos por porcentaje de peso PSL 2								
Grado	Carbono Máx.	Manganeso Máx.	Fósforo Máx.		Azufre Máx.		Titanio Máx.	
X56	0.24	1.40	0.025		0.015		0.04	
Requisitos de Tracción para PSL 2								
Grado	Límite de fluencia Mínimo		Límite de fluencia Máximo		Resistencia a la tracción Mínimo		Resistencia a la tracción Máximo	
	Psi	MPa	Psi	MPa	Psi	MPa	psi	MPa
X56	56,000	386	79,000	544	71,000	490	110,000	758

(Fuente: API 5L, 2004)

1.2. Soldadura

La soldadura implica la coalescencia localizada de dos o más materiales metálicos o no metálicos, este proceso de conformado se realiza mediante el calentamiento de los materiales hasta su temperatura de ablandamiento o fusión permitiendo la unión de los granos, esto se desarrolla con o sin la aplicación de material de aporte o presión localizada.

Los elementos principales en una soldadura típica se muestran en la figura 1.3. Esta vista es de la sección transversal de una junta soldada.

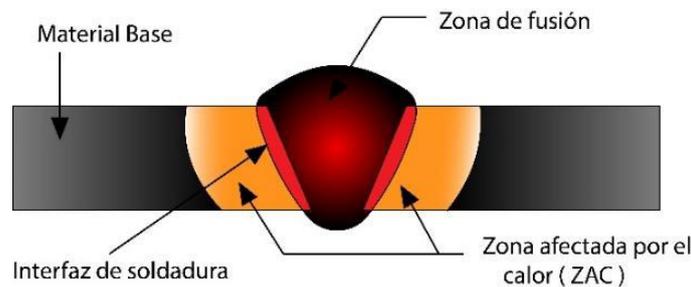


Figura 1.3. Zonas principales de junta soldada por fusión típica.

(Fuente: AWS Handbook, 1996)

En el proceso de soldadura intervienen las siguientes variables:

- Material Base.- es el metal o material a ser soldado
- Material aporte.- es el material que será agregado en la realización de una junta soldada.
- ZAC.- Es el volumen o zona del metal que experimenta transformaciones en su microestructura debido a los cambios de temperatura generados por el proceso de soldadura.

La versatilidad, el constante estudio y desarrollo de los procesos de soldadura, ha permitido que sean usados en la manufactura, en la construcción, en la industria petrolera, entre otras. Existen diferentes tipos de soldadura los mismos que hemos agrupado según el modo en que el calor es aplicado, la presión, el equipo empleado y tipo de energía. Tomando en cuenta los parámetros anteriores se detallan en la figura 1.4 las técnicas y procesos de soldadura. (Jeffus, 2009)

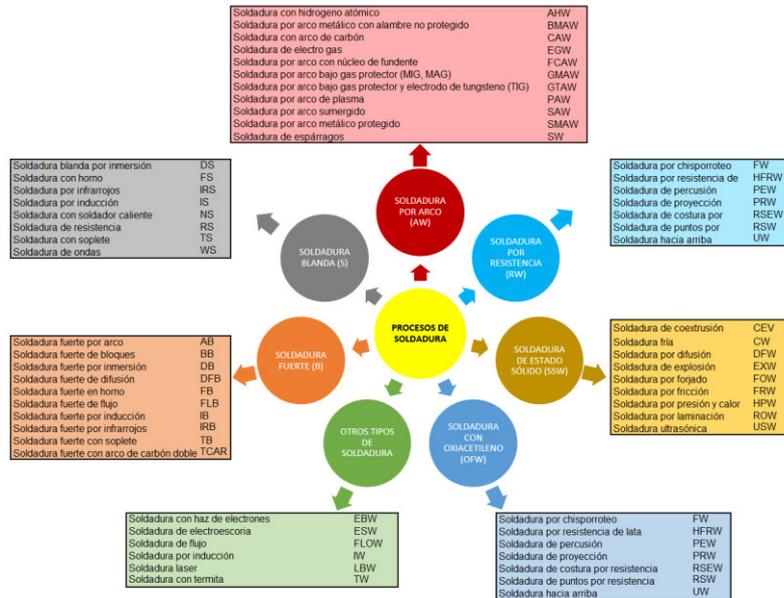


Figura 1.4. Clasificación de procesos de soldadura.

(Fuente: Jeffus Larry, 2009)

1.2.1. Soldadura SMAW

La soldadura por arco de metal protegido (SMAW) por sus siglas en inglés es un proceso donde la coalescencia de metales es producido por un arco eléctrico empleando un electrodo revestido con un fundente que al ser derretido forma una atmósfera protectora.

El arco eléctrico es generado desde la punta del electrodo hacia la superficie del metal base y mientras es alejado el material base y el electrodo fundido se solidifican. Al enfriarse esta unión se crea una protección superficial conocida como escoria, la misma que está formada por impurezas que son expulsadas de la soldadura durante la solidificación, esta protección evita un enfriamiento brusco de la soldadura que afecte a sus propiedades mecánicas.

La soldadura se forma a partir de un circuito eléctrico como se muestra en la figura 1.5 este circuito consta de 5 elementos: la fuente de alimentación, portaelectrodos, conexión con la pieza de trabajo, material base y electrodo.

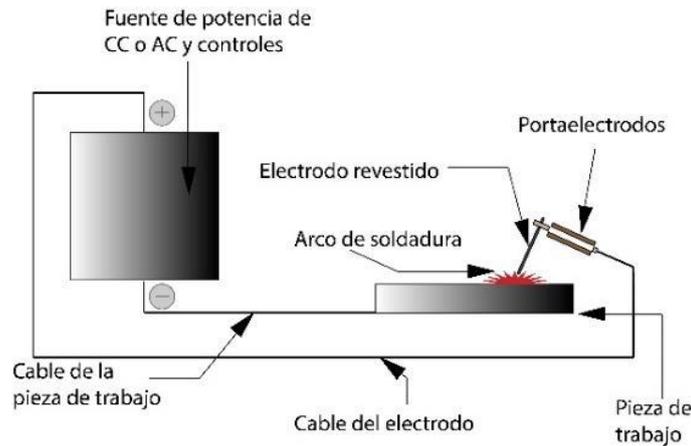


Figura 1.5. Circuito típico para soldadura por arco de metal protegido.
(Fuente: AWS Handbook, 1996)

El arco eléctrico funde el electrodo revestido y forma pequeños glóbulos de metal base que se unen en un charco de soldadura como se observa en la figura 1.6. La corriente eléctrica debe ser lo suficientemente alta para derretir el electrodo y la cantidad apropiada de material base. El electrodo para soldadura define los requerimientos de voltaje y amperaje del arco eléctrico. (AWS Handbook, 1996)

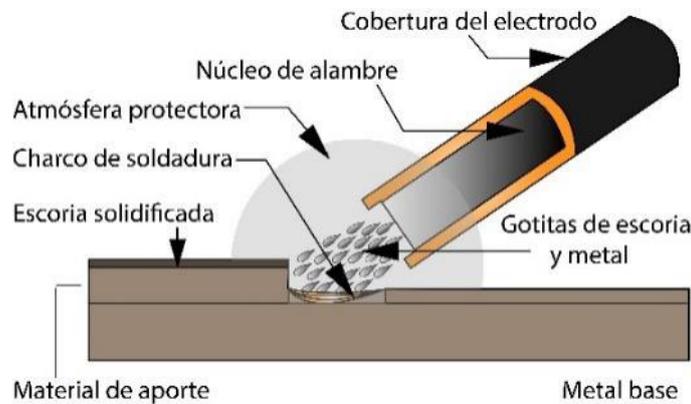


Figura 1.6. Proceso de soldadura por arco de metal protegido.
(Fuente: AWS Handbook, 1996)

1.2.1.1. Tipos de corriente

La soldadura SMAW puede emplear fuentes de potencia de corriente alterna (AC) o corriente continua (CC), la fuente es seleccionada dependiendo del tipo y especificación del electrodo, esta variable influye en su rendimiento. Se puede emplear dos tipos de polaridad cuando se aplica corriente continua: polaridad inversa o electrodo positivo y polaridad directa o electrodo negativo.

La dirección del flujo de corriente determina la polaridad del sistema, cuando el cable de la porta electrodo es conectado a la parte positiva de la fuente se denomina polaridad inversa y si es conectada a la parte negativa de la fuente es polaridad directa. La polaridad inversa logra mayor penetración mientras que la directa aumenta la rapidez de fusión del electrodo. (AWS Handbook, 1996).

1.2.1.2. Generalidades del electrodo

El electrodo en el proceso de soldadura SMAW cumple con diferentes funciones como: proveer el gas de protección del arco de soldadura, proporcionar desoxidantes, limpiadores y fundentes, establecer el medio para añadir aleantes a la soldadura que modifiquen las propiedades mecánicas además de suministrar el material de aporte para la soldadura.

En aceros al carbono existe gran variedad de electrodos con diferente composición en el revestimiento como en el núcleo, propiedades mecánicas, el tipo de corriente o las posiciones a soldarse estos están clasificados por la American Welding Society AWS, en la tabla 1.2. Se presentan las especificaciones para electrodos de soldadura por arco en aceros al carbono.

Tabla 1.2. Especificaciones AWS para electrodos cubiertos.

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

(Fuente: AWS Handbook, 1996)

Los electrodos se denominan según la norma ANSI/AWS A5.1, en la figura 1.7 se detalla la nomenclatura usada.

NOMENCLATURA PARA ELECTRODOS AWS

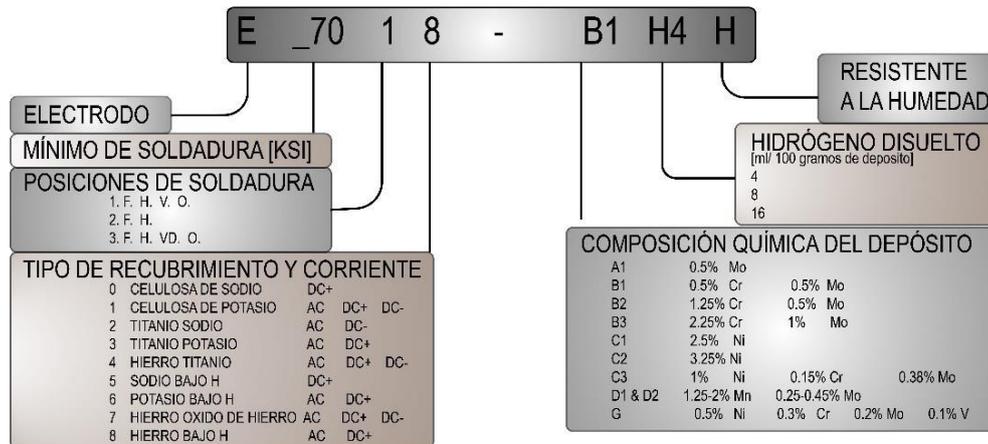


Figura 1.7. Nomenclatura ANSI/AWS A5.1 para electrodos de acero dulce.

(Fuente: API/AWS A 5.1.)

1.2.1.3. Especificaciones del electrodo E7010

Este electrodo cumple los estándares especificados en la norma ANSI/AWS A5.5, cuyas características de composición química y propiedades mecánicas se muestran en la tabla 1.3. Este electrodo que es empleado para soldaduras en tuberías con uniones a tope tiene alto contenido de celulosa, trabaja con corriente continua, produce poca escoria y permite penetración profunda en la soldadura, en el Anexo I se detalla las especificaciones del electrodo empleado.

Tabla 1.3. Características y especificaciones para electrodo E7010-A1

Composición química del metal depositado para el electrodo E7010-A1					
C 0,12% Mn 0.6% Si 0,40% P 0,03% S 0,03% Mo 0,4% - 0.65%					
Tipo de corriente	Esf. Máx. de Tracción		Esf. Fluencia en 0.2%		Elongación [%]
	[ksi]	[Mpa]	[ksi]	[Mpa]	
CCEP	70	490	57	390	22
Diámetro [mm]	Longitud [mm]	Amperaje		Electrodos [E/kg]	
		Min [A]	Max [A]		
3.25	300	80	120	35	
4	350	100	150	24	
5	350	140	200	17	

(Fuente: AWS A5.5)

1.2.1.4. Especificaciones del electrodo E7018

Este electrodo cumple los estándares especificados en la norma ANSI/AWS A5.1. Este electrodo está compuesto de polvo de hierro y tiene bajo contenido de hidrógeno, los cordones de soldaduras son resistentes al agrietamiento, libres de poros, facilita la limpieza

de escoria. En la tabla 1.4 se muestra la composición química del electrodo y sus propiedades mecánicas, en el Anexo II se detallan las especificaciones del electrodo a utilizar.

Tabla 1.4. Características y especificaciones para electrodo E7018

Composición química del metal depositado para el electrodo E7018					
C 0,05% Mn 0,87% Si 0,65% P 0,013% S 0,010% Cr 0,05% Ni 0,06% Mo 0,51%					
Tipo de corriente	Esf. Máx. de Tracción		Esf. Fluencia en 0.2%		Elongación [%]
	[ksi]	[Mpa]	[ksi]	[Mpa]	
CCEP	70	490	58	400	22
Diámetro [mm]	Longitud [mm]	Amperaje		Electrodos [E/kg]	
		Min [A]	Max [A]		
2.4	300	70	100	55	
3.2	350	100	140	28	
4.0	350	140	200	20	
4.8	350	200	270	14	

(Fuente: AWS A5.1)

1.2.2. Soldadura GTAW

El proceso de soldadura por arco de tungsteno y gas GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), genera la coalescencia de los metales mediante un arco desarrollado entre un electrodo de tungsteno y el charco de soldadura, durante este proceso se utiliza gas de protección sin la aplicación de presión.

La soldadura GTAW emplea un electrodo no consumible sostenido por un soplete, el mismo que emite un gas para proteger al metal base, charco de soldadura y electrodo durante la solidificación. En la figura 1.8 se muestra el esquema del funcionamiento de la soldadura GTAW, el arco eléctrico está formado en una atmósfera ionizada que permite la conducción de electricidad desde la punta del electrodo hacia el metal base, este se funde produciendo el charco de soldadura.

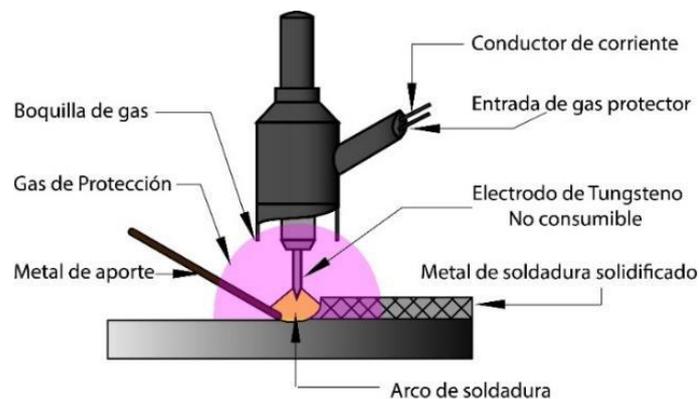


Figura 1.8. Esquema de funcionamiento de soldadura por arco de tungsteno y gas.

(Fuente: AWS Handbook, 1996)

Cuando se emplea material de aporte se alimenta progresivamente delante del charco de soldadura. Los componentes básicos del procedimiento son: soplete, electrodo, fuente de potencia y gas protector estos se visualizan en la figura 1.9.

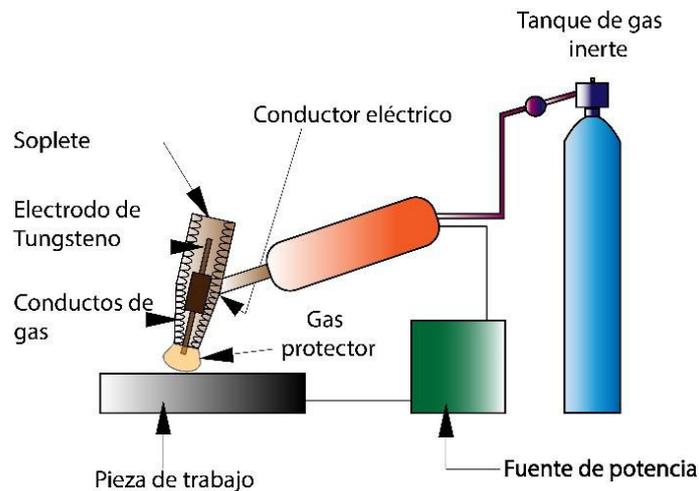


Figura 1.9. Circuito típico de soldadura por arco de tungsteno y gas.

(Fuente: AWS Handbook, 1996)

1.2.2.1. Tipos de corriente

Para este proceso de soldadura se tienen fuentes de potencia en corriente alterna (CA) y corriente continua (CC), en corriente continua se tienen dos variaciones: electrodo negativo (CCEN) y electrodo positivo (CCEP). En la figura 1.10 se muestran las características típicas de cada tipo de corriente en soldadura GTAW. (AWS Handbook, 1996).

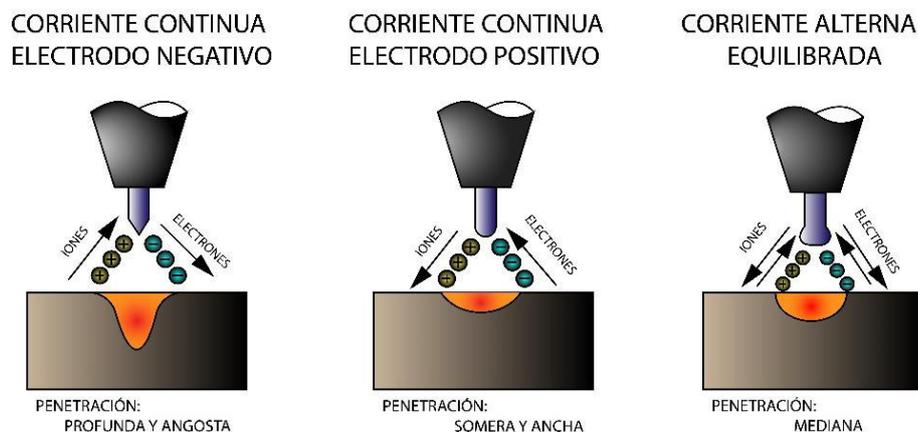


Figura 1.10. Características de los tipos de corriente para soldadura GTAW.

(Fuente: AWS Handbook, 1996)

1.2.2.2. Generalidades del electrodo no consumible

El electrodo de tungsteno en el proceso GTAW tiene como objetivo servir de terminal eléctrico del arco de soldadura, ya que el material es tungsteno puro es un electrodo no consumible que no transfiere material en la soldadura. Si se necesita la adición de metal se recurre a alambres de alimentación como materiales de aporte.

1.2.2.3. Especificaciones del alambre de alimentación ER80S

Este material de aporte está diseñado para procesos GTAW bajo la norma AWS A5.28. Es empleado para soldadura en tuberías, entre sus especificaciones se debe emplear electrodo negativo para evitar la fusión del electrodo de tungsteno y se usa argón como gas de protección. En la tabla 1.5 se detalla la composición química y propiedades mecánicas del material de aporte, en el Anexo III se detallan las especificaciones del material de aporte a utilizar.

Tabla 1.5. Características y especificaciones para el material de aporte ER80S-B2.

Composición química del metal depositado para el material de aporte ER80S-B2					
C 0,07-0,12% Mn 0,40-0,70% Si 0,40-0,70% P 0,025% S 0,025% Cr 1,20-1,50% Ni 0,20% Mo 0,40-0,65% Cu 0,35%					
Tipo de corriente	Esf. Máx. de Tracción		Esf. Fluencia en 0.2%		Elongación [%]
	[ksi]	[Mpa]	[ksi]	[Mpa]	
CCEN	80	550	68	470	19
Diámetro [mm]	Peso [kg]		Gas de Protección		
1,6	4,5-13,6		Argón /1-5% O2		
2,4	4,5-13,6				
3,2	4,5-13,6				

(Fuente: AWS A5.28)

1.2.2.4. Características del gas de protección

El helio y el argón constituyen los gases de protección más empleados en esta soldadura, dependiendo de las características del material base y de aporte se aplica uno de estos gases o la combinación de ambos.

El argón es empleado en procesos de soldadura manuales y el helio en procesos mecanizados. La protección con un gas reduce el agrietamiento en la raíz de la junta y disminuye la porosidad de la soldadura.

1.2.2.4.1. Argón

Es un gas monoatómico, para el proceso de soldadura GTAW se refina hasta una pureza de 99.95%. El argón es más empleado que el helio ya que proporciona un arco más uniforme y silencioso, tiene menor costo y mayor disponibilidad, brinda mayor protección con tasas de flujo más bajas y facilita la limpieza e iniciación del arco. La tabla de especificaciones del gas empleado se encuentra detallada en el Anexo IV.

1.3. Corrosión

1.3.1. Corrosión

Se ha establecido el término de corrosión para describir el fenómeno de reacciones químicas y electroquímicas que genera deterioro y alteración en las propiedades de los metales puros o de sus aleaciones.

La corrosión también se puede explicar bajo el concepto de la metalurgia extractiva inversa, en que todos los metales se encuentran en la naturaleza en un estado combinado con diferentes óxidos, minerales, silicatos o carbonatos, siendo esta combinación el estado de menor energía o estado natural de los metales. La energía usada en la extracción, en la separación y en el procesamiento de los metales, inducen un estado de mayor energía. La corrosión es el medio por el cual el metal con el paso del tiempo busca regresar a su estado natural para estabilizarse termodinámicamente. (Javaherdashti, 2008).

1.3.1.1. Celda electroquímica

Una celda electroquímica se encuentra compuesta de cuatro elementos que conforman un circuito, estos elementos son:

Ánodo.- Es el elemento del circuito que cede los electrones y se corroe.

Cátodo.- Mediante una reacción química o catódica recibe los electrones en el circuito.

Electrolito.- Es el medio que permite cerrar el circuito entre el ánodo y el cátodo, generalmente es un líquido conductor que permite el flujo de electrones.

Conexión eléctrica.- Debe existir una conexión eléctrica que generalmente se da con el contacto físico de ambos electrodos, esto permite el flujo de electrones del ánodo al cátodo.

1.3.1.2. Reacción de oxidación

Es la reacción en la cual los metales forman iones que se convierten en una solución acuosa denominada reacción anódica, provocando la disolución del metal (ánodo) en el electrolito. En la reacción anódica los átomos metálicos forman cationes y se crean electrones.

1.3.1.3. Reacción de Reducción

Es la reacción en la cual un metal (cátodo) reduce su carga de valencia, se la denomina reacción catódica. Durante la reacción catódica se produce un consumo de electrones.

1.3.2. Tipos de Corrosión

Se puede clasificar los tipos de corrosión según el aspecto del metal en la que esta se manifiesta, los tipos de corrosión que generalmente se encuentran en los metales son detallados en la figura 1.11.

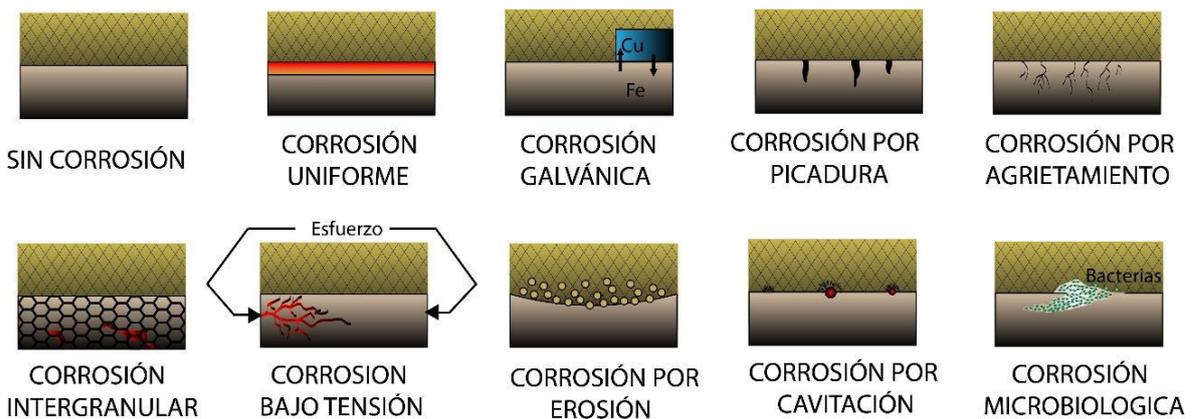


Figura 1.11. Tipos de corrosión en metales y aleaciones.

(Fuente: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/mgd/herandez_m_js/capitulo1.pdf)

1.3.2.1. Corrosión uniforme

La corrosión uniforme o generalizada se produce mediante una reacción química o electroquímica a velocidad homogénea, generando aleatoriamente reacciones de reducción y oxidación sobre toda la superficie metálica expuesta.

La corrosión uniforme representa la mayor pérdida de masa, pero este tipo de corrosión es fácil de predecir, es posible controlarla con el uso de inhibidores, recubrimientos protectores o mediante la protección catódica.

1.3.2.2. Corrosión galvánica

Se produce cuando al unir dos metales de diferente naturaleza forman un ánodo y un cátodo, esta unión al entrar en contacto con un electrolito forma una celda electroquímica que da origen a la corrosión, el material que presente menor potencial electroquímico será el que tienda a corroerse. La velocidad de corrosión aumenta mientras mayor sea la relación entre el ánodo con respecto al cátodo. (Baboian, 2005)

1.3.2.3. Corrosión por picadura

También conocida como pitting es una forma de corrosión localizada que forma pequeños agujeros o picaduras en dirección casi perpendicular a la superficie, es muy destructiva y puede perforar el metal convirtiéndose en una amenaza y un posible fallo repentino e inesperado de los elementos y estructuras de ingeniería.

La corrosión por picadura puede iniciarse en un defecto superficial localizado, en modificaciones de la composición del material o en materiales pasivados en los cuales existe una acumulación puntual de agentes oxidantes y un incremento en el Ph. Estos escenarios deterioran la capa pasiva y empieza la corrosión, una vez creada la picadura ésta se desplaza hacia el interior del metal formando cavidades ocultas dentro del espesor. (Callister, 2003)

1.3.2.4. Corrosión por agrietamiento

Este tipo de corrosión se generan en grietas, rendijas o en superficies recubiertas ya sean del mismo material u otros, en las cuales existe una entrada de unos cuantos micrómetros que sea lo suficientemente ancha para que ingrese un electrolito, además lo suficientemente estrecha para producir un estancamiento. Una vez consumido el oxígeno y con la diferencia de concentración de iones o gases del electrolito con respecto a otras regiones de la misma estructura se crea una celda electroquímica que produce la corrosión.

1.3.2.5. Corrosión intergranular

Es un tipo de corrosión localizada que se produce a lo largo de los límites de grano de algunas aleaciones y algunos aceros inoxidable. Este fenómeno sucede cuando el metal es calentado en un intervalo de temperatura de (500 y 800) [°C] durante periodos suficientemente largos creando la denominada temperatura de sensibilización, en estas condiciones los límites de grano son los ánodos y el grano sería el cátodo y formarían una celda electroquímica que produce la corrosión intergranular.

1.3.2.6. Corrosión bajo tensión

Este tipo de corrosión combina un ambiente corrosivo y un esfuerzo de tensión aplicada interna o externamente al metal, forman pequeñas fisuras o grietas que se propagan en dirección perpendicular al esfuerzo a través de la sección metálica dando paso el proceso de corrosión, esto podría desencadenar en un fallo del elemento o la estructura, ya que la corrosión debilita el material mientras que la tensión aplicada fractura el material facilitando la propagación de la corrosión en un área mayor. Las tensiones internas pueden ser consecuencia de los esfuerzos residuales de soldadura, de trabajos en frío o esfuerzos térmicos residuales debido a la mala aplicación de un tratamiento térmico.

1.3.3. Pruebas de Corrosión

Las pruebas de corrosión son comúnmente empleadas en la fase de diseño para la adecuada selección del material tomando en cuenta la aplicación, las condiciones de servicio y las condiciones ambientales en la cual este se va desempeñar.

Se debe considerar dos factores relevantes en las pruebas corrosión, la primera es la velocidad de reacción y la segunda es la tendencia del material a corroerse. Los factores que afectan la velocidad de corrosión que pueden tomarse en cuenta durante la prueba son: composición del material y procesamiento metalúrgico, temperatura de servicio, composición química del electrolito, velocidad del electrolito, periodos húmedo-seco, duración de la exposición y fuerzas mecánicas de tensión o compresión. (Baboian, 2005)

Los tipos de pruebas de corrosión son:

- Pruebas electroquímicas
- Pruebas de gabinete
- Pruebas de inmersión
- Pruebas a condiciones atmosféricas
- Pruebas en agua de mar
- Pruebas en suelos

1.3.3.1. Prueba de inmersión

Las pruebas de corrosión en laboratorio o por inmersión son frecuentemente usadas en industrias químicas o plantas con procesos complejos ya que muchos materiales están sometidos a contacto directo con sustancias corrosivas o químicos que degradan al material. Para el diseño de toda planta es necesario la selección adecuada de materiales

tomando en cuenta diferentes factores como el historial de servicio previo, pruebas de corrosión de planta en campo, pruebas de corrosión de planta piloto y pruebas de corrosión de laboratorio. Las pruebas de corrosión de planta piloto son la mejor alternativa a estudiar sin embargo muchas plantas tienen funcionamiento de corto plazo y no entregan datos que permitan estudiar la tasa de corrosión a largo plazo, es por esto que las pruebas de laboratorio son las más empleadas. (Baboian, 2005)

Las pruebas de inmersión nos permiten resultados en menor tiempo debido a la variación de parámetros, variación de las condiciones del proceso o el uso de procesos electroquímicos además entregan información a menor costo que otras pruebas de corrosión. En la norma ASTM G31-12 se describen los parámetros, variables y condiciones necesarias para realizar pruebas de corrosión por inmersión en laboratorios.

1.3.4. Cálculo de la tasa de corrosión

La tasa de corrosión es calculada a partir de pruebas de pérdida de masa, estas pruebas proporcionan información acerca de la cantidad de material perdido y es expresada en unidades del sistema internacional en milímetros por año (mm / a). Para las pruebas de pérdida de masa se preparan probetas metálicas, que son limpiadas y posteriormente pesadas previas a ser expuestas al medio corrosivo, después del periodo de exposición se limpian los productos de la corrosión (ASTM G1) y se vuelven a pesar, con esta diferencia de masa se calcula la tasa de corrosión. Para el cálculo de la tasa de corrosión se emplea la ecuación 1.1.

$$\text{Tasa de Corrosión} = \frac{K \times W}{A \times T \times D}$$

Ecuación 1.1

Dónde:

K = constante

T = tiempo de exposición [horas]

A = área [cm²]

W = pérdida de masa [g]

D = densidad [g/cm³]

La constante K varía de acuerdo a las unidades con las que se trabaja, a continuación en la tabla 1.6 detallan los valores de K.

Tabla 1.6. Valores de constante K para la tasa de corrosión.

Unidades de velocidad de corrosión deseadas	Constante (K) en la ecuación de la tasa de corrosión
Milésima de pulgada por año [mpa]	3.45×10^6
Pulgadas por año [ppa]	3.45×10^3
Pulgadas por mes [ppm]	2.87×10^2
Milímetros por año [mm / a]	8.76×10^4
Micrómetros por año [$\mu\text{m} / \text{a}$]	8.76×10^7
Picómetros por segundo [pm / s]	2.78×10^6
Gramos por metro cuadrado por hora [$\text{g} / (\text{m}^2) \cdot \text{h}$]	$1.00 \times 10^4 \times \text{D}$
Miligramos por decímetro cuadrado por día [mdd]	$2.40 \times 10^6 \times \text{D}$
Microgramos por metro cuadrado por segundo [$\mu\text{g} / (\text{m}^2) \cdot \text{s}$]	$2.78 \times 10^6 \times \text{D}$

(Fuente: ASTM International G1-03 Práctica estándar para preparar, limpiar y evaluar muestras de prueba de corrosión, 2017)

1.3.5. Agente Corrosivo

Según la ASTM G31-12 los agentes corrosivos usados en las pruebas de inmersión deben prepararse bajo los estándares de calidad de laboratorio que se encuentran validados por el Comité de Reactivos Analíticos de la American Chemical Society (ACS).

1.3.5.1. Cloruro férrico hexahidratado

El cloruro de hierro III o cloruro férrico hexahidratado cuya fórmula es $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, es un reactivo químico perteneciente al grupo de los haluros metálicos. Aproximadamente el 60% de la producción de cloruro férrico hexahidratado se utiliza en el tratamiento de agua potable o aguas residuales, además es un compuesto con varias aplicaciones industriales y es empleado por laboratorios con fines analíticos, comercialmente se lo puede encontrar en soluciones o en estado sólido.

La SGA Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos clasifica al Cloruro férrico hexahidratado como sustancia peligrosa debido a que es un reactivo corrosivo para los metales y produce toxicidad aguda, corrosión o irritación cutánea, lesiones oculares graves o irritación ocular y sensibilización cutánea. Es por eso que se debe tener precaución con el uso y manipulación del Cloruro férrico hexahidratado ya que si es inhalado es agresivo contra el tracto respiratorio, las mucosas, intestino e hígado.

Se aprovecha que la sustancia es corrosiva en los metales para realizar pruebas de corrosión por inmersión o de laboratorio, en el Anexo V se muestran las especificaciones del cloruro de hierro III (ACS REAGENT CHEMICAL).

2. METODOLOGÍA

El presente proyecto de titulación tiene como finalidad estudiar el comportamiento del metal en la tubería API 5L X56 de grado PSL 2 cuando es sometido a procedimientos de soldadura SMAW y GTAW-SMAW en tensión e inmersa en un medio corrosivo como el cloruro férrico. La figura 2.1 detalla la metodología a seguir y las normas a emplear para el desarrollo y alcance de los objetivos propuestos.



Figura 2.1. Metodología
(Fuente: Propia)

2.1. Caracterización del metal base

Para caracterizar el material de la tubería con designación API 5L X56 Grado PSL 2, se realizan ensayos mecánicos y químicos según indica la norma API 5L, para la tubería con las características dimensionales la extracción de las probetas está especificada en la figura 2.2, se requiere los ensayos de tracción, dureza y análisis químico que demuestren que sus características mecánicas y químicas se encuentren dentro del rango de aceptación para tuberías API con la designación señalada.

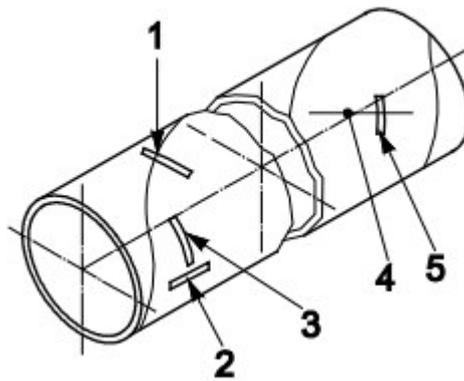


Figura 2.2. Disposición de las muestras para ensayos de tuberías con $D > 20$ cm
(Fuente: API 5L, 2004)

2.1.1. Ensayos mecánicos

Para caracterizar al metal de la tubería se requiere obtener sus propiedades mecánicas para ello utilizamos los ensayos de tracción y dureza que nos entregan información de su resistencia a la tracción, resistencia a la fluencia, carga máxima y porcentaje de elongación.

2.1.1.1. Ensayo de tracción

Las muestras para el ensayo de tracción se obtienen bajo la norma API 5L literal 5.8, en la figura 2.3, se especifican las dimensiones para una tubería con diámetro exterior de 20 pulgadas y espesor de 8 mm.

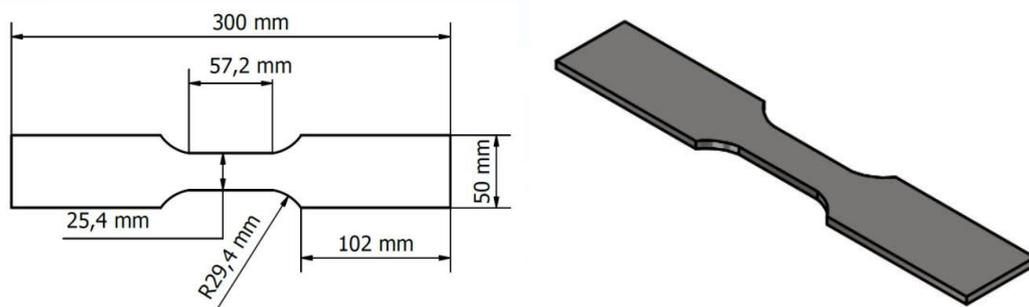


Figura 2.3. Dimensiones de la probeta para el ensayo de tracción del material base
(Fuente: Propia)

2.1.1.1.1. Procedimiento

- Las muestras se identifican con un código individual para la posterior recolección de datos.
- Se registran las dimensiones de cada probeta y se marca la longitud inicial L_0 en cada una de ellas.

- Se procede con el ensayo en la máquina universal de Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones cuyas características se tienen en la tabla 2.1.
- Se especifica la velocidad de ensayo en el intervalo de 0 a 76 mm/ minuto.
- Se registran los datos hasta la rotura del material información entregada por el equipo y las dimensiones finales de las muestras, la longitud de elongación es denominada Lf.

Tabla 2.1. Características de la Máquina Universal para el ensayo de tracción

MÁQUINA UNIVERSAL	
Marca:	TINIUS OLSEN
Modelo:	Tinius Olsen Super "L"
Precisión:	+0,5% de la carga indicada desde 0,2% a 100% de la capacidad total.
Capacidad:	Desde 30,000 hasta 600,000 lbf (150 a 3,000kN) o mayores.



(Fuente: Catálogo Tinius Olsen, 117-G, 2010)

2.1.1.2. Ensayo de dureza

2.1.1.2.1. Procedimiento

Se identifican las muestras con los siguientes códigos 20-051-MB-01-T y 20-051-MB-02-L

Las muestras son preparadas con un desbaste en la superficie del material para obtener paralelismo entre las caras.

Se marcan los puntos de referencia para las indentaciones con una distancia mínima de 5 mm entre ellas como se muestra en la figura 2.4.

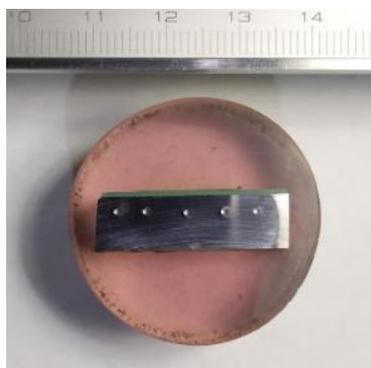


Figura 2.4. Disposición de las indentaciones para ensayo de dureza.

(Fuente: Propia)

Se colocan las muestras en el equipo para realizar las mediciones en escala Rockwell B y Rockwell C.

Se encera cuando la punta del indentador se encuentra en contacto con la superficie del metal, se realiza un avance hasta registrar variación en la aguja, se espera un intervalo de tiempo para la estabilización y se descarga.

Se registran las durezas resultantes del ensayo.

2.1.2. Ensayos Químicos

Se emplea el ensayo químico para determinar la composición del material, este es realizado con un análisis de espectrometría por chispa, se extraen dos muestras con las características dimensionales mostradas en la figura 2.5.

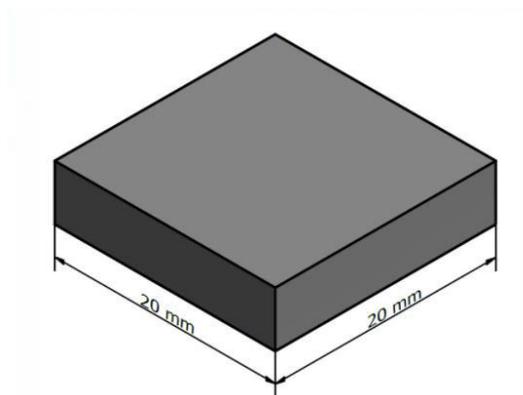


Figura 2.5. Características dimensionales para ensayo químico.

(Fuente: Propia)

2.1.2.1. Procedimiento

La probeta M1 se emplea para obtener los datos, estos son tomados en dos puntos diferentes para promediar sus resultados y obtener la composición química real de toda la muestra.

2.1.3. Ensayos metalográficos

Los ensayos metalográficos nos entregan información acerca de las microestructuras presentes en el acero a estudiar, para ello es necesario el equipo adecuado y el tratamiento adecuado a las superficies de las probetas. Se extraen dos muestras para el ensayo metalográfico del material base con las características dimensionales mostradas en la figura 2.6.

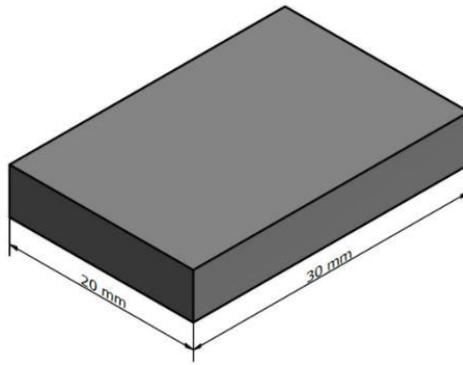


Figura 2.6. Características dimensionales para ensayo metalográfico.

(Fuente: Propia)

2.1.3.1. Procedimiento

- Se identifican dos muestras con las características dimensionales solicitadas.
- Se colocan las muestras en resina para la preparación de las superficies del acero.
- Se realiza un desbaste, lijado y ataque químico con Nital al 10%
- Se observan las superficies empleando un microscopio.
- Se extraen las micrografías para el posterior estudio.

2.2. Procedimientos de Soldadura de la Tubería API 5L X56

Los procedimientos de soldadura se realizaron según las especificaciones detalladas en la norma API 1104, norma aplicada en la soldadura de tuberías e instalaciones relacionadas, en la que se especifica los procesos de soldadura permisibles, los tipos de junta, ensayos destructivos, ensayos no destructivos, los procedimientos y estándares de aceptación para las soldaduras de tubería al carbono utilizadas en la compresión, bombeo y transporte de petróleo crudo, derivados de petróleo, nitrógeno, dióxido de carbono y gases combustibles. (API 1104, 2013).

2.2.1. Preparación de la junta soldada.

Uno de los pilares en los que se sustenta el presente trabajo de investigación es la correcta ejecución de dos procesos de soldadura de tubería con diferentes características, la primera soldadura se realizó con una combinación de electrodos E7010 para el pase de raíz y E7018 en los pases de relleno con el proceso SMAW. La segunda soldadura fue realizada con una combinación de electrodos ER80S para el pase de raíz y E8018 en los pases de relleno en los procesos GTAW y SMAW respectivamente.

- El material base fueron dos segmentos de tubería API 5LX 56 M Grado PSL 2 de diámetro exterior 20 pulgadas, espesor promedio 8,5 mm y cada uno de 1,2 m de longitud.
- Se extraen cuatro secciones de 30 cm de longitud que se obtuvo mediante cortes en frío con cierra circular marca: Milwaukee y disco de corte de dientes de carburo de 8 pulgadas.
- Posterior en un torno de alta capacidad perteneciente a la Metalmecánica de San Bartolo de la Escuela Politécnica Nacional se realizó un refrentado y un biselado a 60° en una cara de las cuatro secciones.
- Finalmente se realiza la alineación, preparación y limpieza de las juntas en posición 6G según los lineamientos especificados en los ANEXOS VI y VII, siguiendo las recomendaciones establecidas en las normas AWS D1.1 y API 1104, la disposición final de la tubería para la soldadura se muestra en la figura 2.7.



Figura 2.7. Secciones de tubería preparadas, alineadas, limpias y listas para el proceso de soldadura en posición 6G.
(Fuente: Propia)

2.2.2. Carbono equivalente y temperatura de precalentamiento

El precalentamiento consiste en calentar el metal base ya sea en su totalidad o sólo el área de la junta previo a la ejecución de un proceso de soldadura, con el fin de reducir la diferencia de temperaturas entre la zona de soldadura y el resto de la pieza.

“El carbono equivalente resulta de la suma de las influencias cuantitativas de los distintos elementos que conforman el acero en cuestión, sobre la soldabilidad de este.” (Rodríguez, 2013)

Estas influencias cuantitativas sobre la soldabilidad permiten determinar la temperatura de precalentamiento de un material a través del cálculo del carbono equivalente, para lo cual utilizaremos el método y las ecuaciones de Seferian detallada en la ecuación 2.1, que son la suma del carbono equivalente químico del acero más el carbono equivalente del espesor, esto fue detallado en el libro *Metalurgia de la soldadura* de Héctor Rodríguez Pérez.

$$[C] = [C]_q + [C]_s$$

Ecuación 2.1

$$[C]_q = C + \frac{(Mn + Cr)}{9} + \frac{Ni}{18} + \frac{7 Mo}{90}$$

$$[C]_q = 0.22 + \frac{(1.4 + 0.125)}{9} + \frac{0.012}{18} + \frac{7 * 0}{90}$$

$$[C]_q = 0.39$$

$$[C]_s = 0.005 * S * [C]_q$$

$$[C]_s = 0.005 * 8,5 * 0.39$$

$$[C]_s = 0.0156$$

$$[C] = [C]_q + [C]_s$$

$$[C] = 0.4056$$

$$\text{Temperatura de precalentamiento} = 350 * \sqrt{[C] - 0.25}$$

$$\text{Temperatura de precalentamiento} = 350 * \sqrt{0.4056 - 0.25}$$

$$\text{Temperatura de precalentamiento} = 138.06^{\circ}C$$

2.2.3. Especificaciones del equipo de soldadura

Para los dos procesos de soldadura se utilizó la maquina soldadora mostrada en la tabla 2.2 que pertenece al Laboratorio de Soldadura de la Escuela Politécnica Nacional, este equipo permite realizar soldaduras con procesos SMAW y GTAW, por ese motivo se lo ocupo en todos nuestros procesos de soldadura.

Tabla 2.2. Especificaciones equipo de soldadura.

Especificaciones equipo de soldadura	
	<p>Marca: LINCOLN ELECTRIC. Modelo: Invertec V350 Pro. Procesos: SMAW-GTAW. Frecuencia: 60 [Hz]. Fase: 1 [Ph]. Voltaje: 10 - 70 [V] Amperaje: 5 – 425 [A]</p>

(Fuente: Propia).

2.2.4. Soldadura SMAW con electrodos E7010 y E7018

El proceso de soldadura SMAW con electrodos E7010 y E7018 se realizó en el Laboratorio de Soldadura de la Escuela Politécnica Nacional, este proceso manual fue ejecutado por un soldador calificado API en posición 6G, se precalentó el material base con llama oxiacetilénica, a continuación se procedió a realizar el pase de raíz con el electrodo E7010 y para los pases de relleno se utilizó el electrodo E7018.

2.2.4.1. Selección de electrodos E7010 y E7018

Para la selección de los electrodos para el pase de raíz y los pases de relleno se tomó en cuenta, el material base a soldar, la posición de soldadura, el tipo de corriente, que los electrodos posean mayor o igual resistencia mínima a la tracción en comparación al material base, el espesor y que su aplicación sea para soldadura de tuberías con uniones a tope.

El electrodo E7010 tiene un alto contenido de celulosa que produce poca escoria y permite penetración profunda en la soldadura, lo que lo convierte en un excelente electrodo para realizar el pase de raíz.

El electrodo E7018 está compuesto de polvo de hierro, tiene bajo contenido de hidrógeno, facilita la limpieza de escoria, los cordones de soldadura formados son resistentes al agrietamiento y libres de poros, esto nos permite realizar varios pases que estén libres de porosidades u otros defectos, al cumplir con todas estas características se seleccionó para realizar los pases de relleno.

2.2.4.2. Procedimiento proceso de soldadura SMAW

- Refrentar y biselar a 60° las caras a soldarse según lo establecido en WPS, como se detalla en el Anexo VI.
- Colocar y puntear guías interiores para alinear tubería con una apertura de raíz de 2 mm como se establece en el WPS.
- Fijar la tubería alineada sobre una base en posición 6G.
- Precalentar con una llama oxiacetilénica la junta a soldarse.
- Realizar el pase de raíz con el electrodo E7010.
- Ejecutar limpieza de la soldadura con grata de acero entre pases y al finalizar.
- Completar con los pases de relleno utilizando el electrodo E7018.

2.2.5. Soldadura GTAW- SMAW con material de aporte ER80S y electrodo E7018

El proceso de soldadura GTAW-SMAW con material de aporte ER80S y electrodo E7018 se realizó en el Laboratorio de Soldadura de la Escuela Politécnica Nacional, este proceso manual fue ejecutado por el mismo soldador API del proceso anterior, en posición 6G, con precalentamiento del material base con llama oxiacetilénica, se procedió a realizar el pase de raíz con el material de aporte ER80S y para los pases de relleno se utilizó el electrodo E7018.

2.2.5.1. Selección del material de aporte ER80S y del electrodo E7018

Para la selección de material de aporte y electrodo para el pase de raíz y los pases de relleno se tomó en cuenta, la posición de soldadura, el material base a soldar, el espesor, el tipo de corriente, que el material de aporte y electrodo posean mayor o igual resistencia mínima a la tracción en comparación al material base y que su aplicación sea para soldadura de tuberías con uniones a tope.

El material de aporte ER80S está diseñado para procesos GTAW bajo la norma AWS A5.28 y es empleado para soldadura en tuberías, para evitar la fusión del electrodo de tungsteno se debe emplear electrodo negativo y se usa argón como gas de protección, este material de aporte fue utilizado para el pase de raíz.

El electrodo E7018 es el electrodo seleccionado por sus propiedades previamente ya detalladas en el apartado 2.2.4.1 del presente trabajo.

2.2.5.2. Procedimiento proceso de soldadura GTAW-SMAW

- Refrentar y biselar a 60° las caras a soldarse según lo establecido en WPS, como se detalla en el Anexo VII.
- Colocar y puntear guías interiores para alinear tubería con una apertura de raíz de 2 mm como se establece en el WPS.
- Fijar la tubería alineada sobre una base en posición 6G.
- Precalentar con una llama oxiacetilénica la junta a soldarse.
- Realizar el pase de raíz con el material de aporte ER80S.
- Ejecutar limpieza de la soldadura con grata de acero entre pases y al finalizar.
- Completar con los pases de relleno utilizando el electrodo E7018.

2.3. Ensayos de Calificación de Procedimiento.

La caracterización de la soldadura consiste en realizar varios ensayos destructivos o no destructivos con el fin de cumplir con los requisitos de aceptación que se encuentran descritos en las normas API 1104 o la sección IX de la ASME, este trabajo de titulación está sustentado en las directrices de las normas API por lo cual se escogió la norma API 1104 para la validación de los procesos de soldadura.

Para la caracterización de nuestras soldaduras según la Tabla 2.3, la tubería que se estudió tiene un diámetro de 20 pulgadas y un espesor de 1/3 de pulgada, por lo cual se necesitó 16 probetas; 4 probetas ensayos de tracción, 4 probetas ensayos de rotura con entalla, 4 probetas para ensayo de doblado de raíz y finalmente 4 probetas para ensayos de doblado de cara, todo esto se realiza para nuestros dos procesos de soldadura tanto para el proceso SMAW y el proceso GTAW-SMAW.

Tabla 2.3. Tipo y número de probetas para ensayo de calificación de procedimiento.

Diámetro exterior de tubería		Número de probetas					
Pulgadas	Milímetros	Resistencia a la tracción	Rotura con entalla	Doblado de raíz	Doblado de cara	Doblado de lado	Total
Espesor de pared ≤ 0.500" (12.7 mm)							
<2.375	<60.3	0	2	2	0	0	4
2.375-4.500	60.3-114.3	0	2	2	0	0	4
>4.500-12.750	<114.3-323.9	2	2	2	2	0	8
>12.750	>323.9	4	4	4	4	0	16
Espesor de pared > 0.500" (12.7 mm)							
≤ 4.500	≤ 114.3	0	2	0	0	2	4
>4.500-12.750	<114.3-323.9	2	2	0	0	4	8
>12.750	>323.9	4	4	0	0	8	16

(Fuente: Api 1104, 2013).

En la figura 2.8 se muestra la disposición de extracción de las probetas bajo la norma API 1104, siguiendo las recomendaciones de la norma se realizó cortes longitudinales en frío y se extrajo la sección correspondiente a las 4 probetas, posteriormente fueron separadas por cortes refrigerados por agua que se realizaron con la máquina de la figura 2.9.

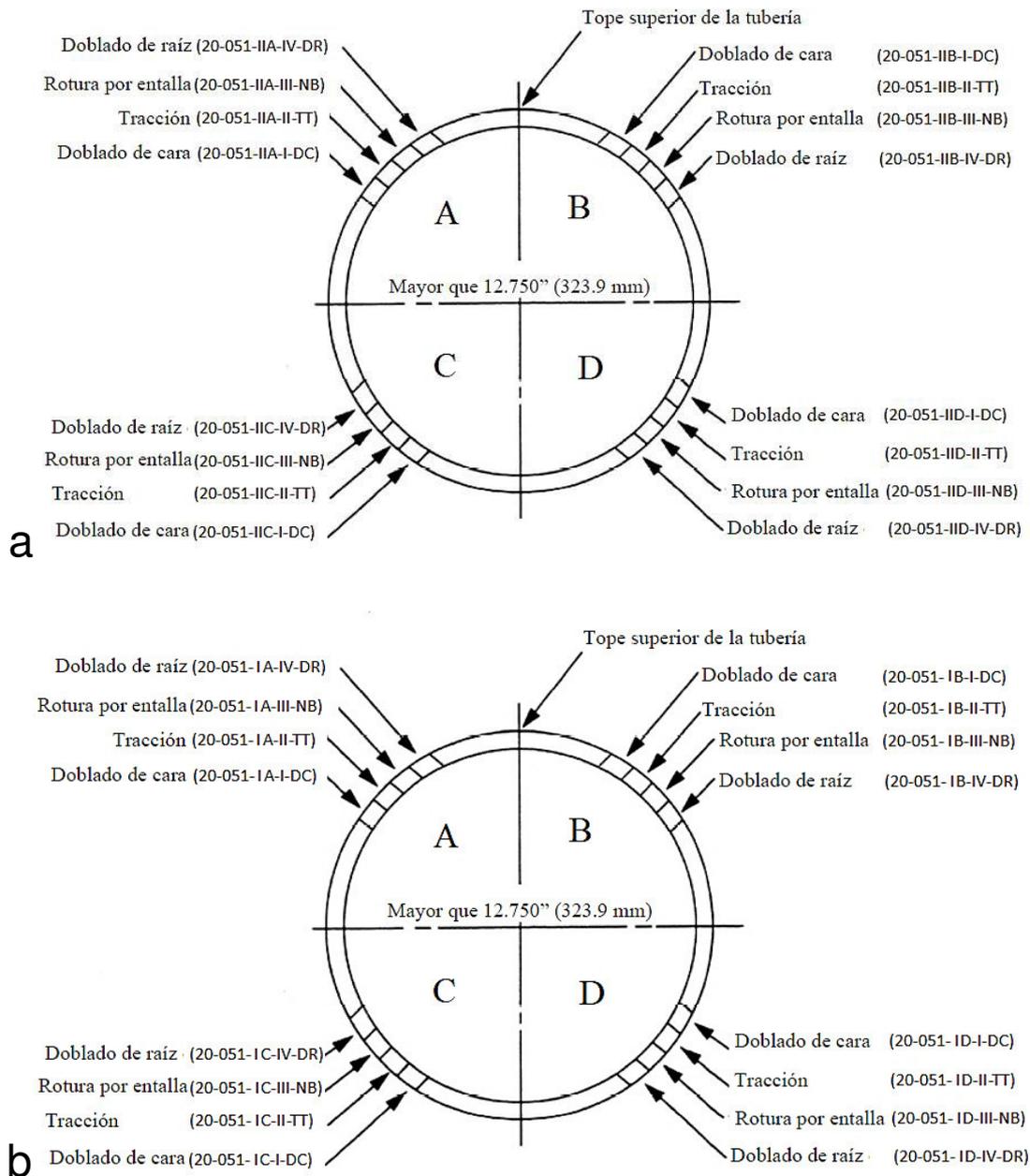


Figura 2.8. a. Localización y nomenclatura de los especímenes de ensayos de soldaduras a tope para la calificación del procedimiento SMAW-SMAW.

b. Localización y nomenclatura de los especímenes de ensayos de soldaduras a tope para la calificación del procedimiento GTAW-SMAW.

(Fuente: Api 1104, 2013)



Figura 2.9. Máquina de corte refrigerado por agua.
(Fuente: Propia)

2.3.1. Ensayos de resistencia a la tracción

Los ensayos de resistencia a la tracción fueron realizados en el Laboratorio De Análisis De Esfuerzos y Vibraciones de la Escuela Politécnica Nacional. El ensayo consiste en aplicar una carga a los extremos de la probeta hasta que esta se rompa. Los requisitos de aceptación se encuentran en la norma API 1104 sección 5.6.2.

En este ensayo se utilizaron 4 probetas de cada proceso de soldadura, las dimensiones se muestran en la Figura 2.10.

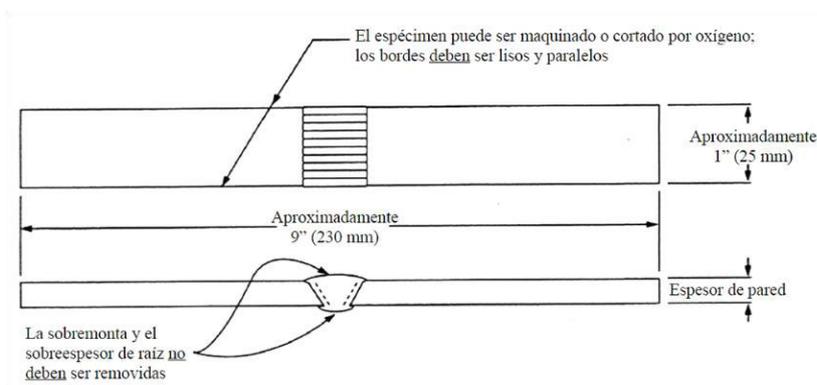


Figura 2.10. Características dimensionales para ensayo de tracción
(Fuente: API 1104, 2013).

2.3.2. Ensayos de Nick-Break

Los ensayos Nick Break fueron realizados en el Laboratorio De Soldadura de la Escuela Politécnica Nacional, estos ensayos consisten en realizar una muesca en todas las caras de la soldadura de la probeta, creando un cuello como se muestra en la figura 2.11 en la que se aprecian las dimensiones de cada probeta, posteriormente se las dobla hasta que se rompan, esto se realiza en las 4 probetas de cada proceso de soldadura.

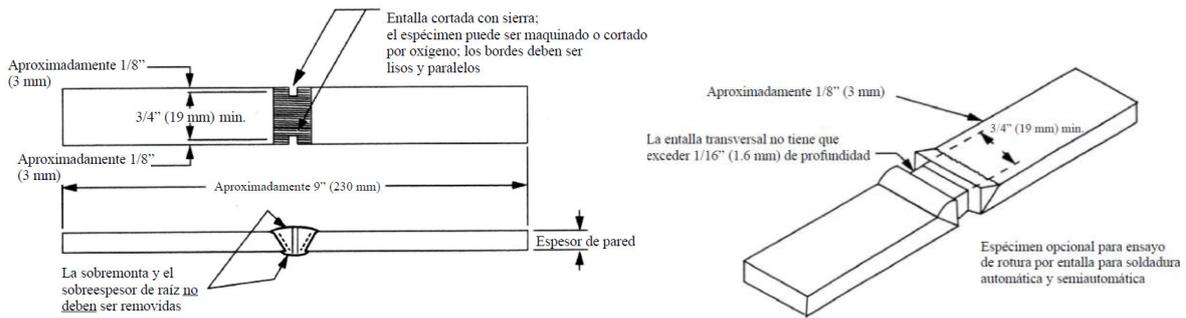


Figura 2.11. Características dimensionales para ensayo de Nick-Break

(Fuente: API 1104, 2013).

2.3.2.1. Procedimiento para ensayo Nick-Break

- Cortar las probetas correspondientes al ensayo Nick Break, con las dimensiones de la Figura 2.11.
- Realizar un chaflán redondeado en los laterales de las probetas con amoladora.
- Realizar la muesca en el centro del cordón soldadura, de aproximadamente 1,8 mm (1/18 pulgadas).
- Doblar la probeta en la máquina hasta provocar su fractura.

2.3.3. Ensayos de doblado de raíz

Los ensayos de raíz fueron realizados en el Laboratorio De Soldadura de la Escuela Politécnica Nacional, se elimina la sobremonta y la raíz con un disco de desbaste, posteriormente se coloca la probeta con la raíz hacia abajo y encima la matriz API que se puede observar en la figura 2.12, finalmente se procede a doblarla bajando el punzón con la ayuda de una prensa. Las dimensiones de la probeta se las puede apreciar en la figura 2.13.

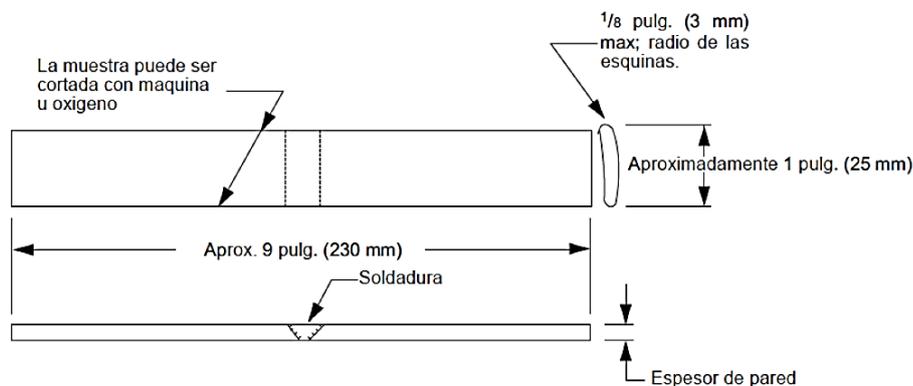
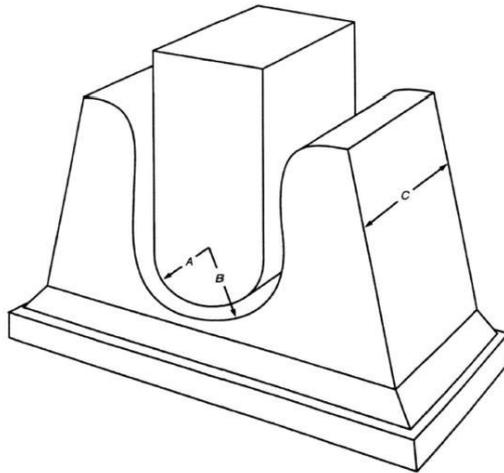


Figura 2.12. Características dimensionales para ensayo de doblado de cara y doblado de raíz.

(Fuente: API 1104, 2013).



Nota: Esta figura no está dibujada a escala. Radio del punzón, $A=1 \frac{3}{4}$ pulg. (45 mm); radio de la matriz, $B=2 \frac{5}{16}$ pulg. (60 mm); ancho de la matriz, $C=2$ pulg. (50 mm).

Figura 2.13. Esquema dispositivo para Ensayo de Doblado.

(Fuente: API 1104, 2013)

2.3.3.1. Procedimiento para ensayo de doblado de raíz

- Cortar las probetas según las dimensiones del esquema de la figura 2.12.
- Retirar la raíz y la sobremonta con amoladora.
- Realizar un chaflán redondeado en los laterales de las probetas con amoladora.
- Seleccionar el troquel y punzón de doblado normalizado bajo la norma API 1104, tal como se muestra en la figura 2.13
- Calibrar la máquina de ensayo de doblez.
- Colocar la probeta con la raíz hacia la parte inferior,
- Centrar parte inferior del émbolo con el cordón de soldadura.
- Accionar la máquina hasta que la probeta se doble y tome la forma del troquel.
- Regresar el émbolo.
- Extraer cuidadosamente la probeta doblada.
- Realizar un examen visual de las probetas dobladas.

2.3.4. Ensayos de doblado de cara

Los ensayos de cara al igual que los de raíz se realizaron en el Laboratorio De Soldadura, para los ensayos de cara se elimina con una amoladora la sobremonta y la raíz, posteriormente se coloca la probeta con la cara hacia abajo y sobre la matriz API,

finalmente se procede a doblarla bajando el punzón con la ayuda de una prensa como se puede observar en la figura 2.14, seguir el procedimiento detallado en la sección 2.3.3.1 colocando la cara hacia la parte inferior.



Figura 2.14. Esquema de la disposición de la probeta para ensayo de cara.
(Fuente: Propia)

2.4. Ensayo de corrosión por inmersión de cloruro férrico

El ensayo de corrosión es realizado para cinco probetas del procedimiento de soldadura SMAW-SMAW y cinco probetas del procedimiento de soldadura GTAW-SMAW, estas probetas son inmersas en cloruro férrico hexahidratado durante periodos de tiempo controlados en los que se mide la masa del material para el posterior cálculo.

Se definen los lineamientos y parámetros a considerar para la realización de este ensayo bajo la norma ASTM G1-03, a continuación se muestra la preparación de la solución, la preparación de las muestras, procedimiento para las mediciones de masa de las probetas, procedimiento para cálculo de la tasa de corrosión y procedimiento para los ensayos micrográficos.

2.4.1. Preparación de la solución

La norma ASTM G1-03 indica que el reactivo corrosivo debe ser preparado bajo la norma del Comité de Reactivos Analíticos de la Sociedad Química Estadounidense.

La solución corrosiva, cloruro férrico hexahidratado, se obtiene al realizar una mezcla manual de 160 g de cloruro férrico en 2000 ml de agua destilada. En la tabla 2.4 se detalla las características de las sustancias empleadas.

Tabla 2.4. Características de componentes empleadas para solución corrosiva.

CLORURO FÉRRICO		AGUA DESTILADA	
Apariencia	Ámbar ligeramente viscoso	Conductividad	0.96 a 1.4 [μ siemen/cm]
Punto de fusión	260 [°C]	pH	6.5 a 7.00
Punto de ebullición	315 [°C]	Metales	negativo
Densidad	1,4-1,5 [g/cm ³]	Cloruros	negativo
Masa Molar	162,2 anhidro	Sulfatos	negativo
			

(Fuente: Propia)

Para determinar la masa del cloruro férrico se emplea una balanza con resolución 0.001 g, las características se detallan en la tabla 2.5.

Tabla 2.5. Características de la balanza empleada en ensayo de corrosión.

BALANZA	
Marca:	RADWAG
Máxima capacidad	6000 [g]
Mínima capacidad	20 [mg]
Legibilidad [d]	0,001 [g]
Rango de tara	-1000 [g]
Repetibilidad (Max)	0,0015 [g]
Repetibilidad (5% Max)	0,0005 [g]
Linealidad	$\pm 0,003$ [g]
Tiempo de estabilización	2 [s]
Calibración	Externa



(Fuente: Propia)

La solución corrosiva resultante presenta un color ámbar oscuro, se coloca 1000 mL de la solución para las probetas con procedimiento de soldadura SMAW-SMAW y 1000 mL para las probetas con procedimiento de soldadura GTAW-SMAW, en la figura 2.15 se muestran dos matraces con la solución resultante, una con 400 mL y otra con 600 mL.



Figura 2.15. Solución corrosiva resultante (1000 mL).
(Fuente: Propia)

2.4.2. Preparación de las probetas

Se extraen cinco probetas de cada procedimiento de soldadura de 310 [mm] x 25 [mm], para ello se realiza un ensayo radiográfico sobre el cordón de soldadura y se definen las áreas para el corte de las probetas, en la figura 2.16 se muestra la disposición de las probetas en la tubería.

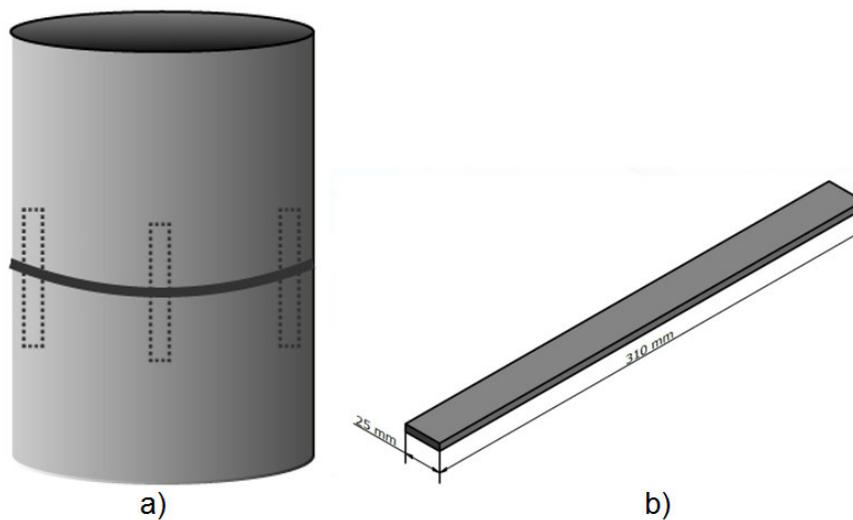


Figura 2.16. a) Disposición de extracción de probetas. b) Características dimensionales para ensayo de corrosión
(Fuente: ASTM G1-03)

Las probetas son dobladas en forma de U según el procedimiento ASTM G30 para someterlas a tensión en el área del cordón de soldadura, en la figura 2.17 se detalla la nomenclatura empleada para el registro de los datos dimensionales para el cálculo del área expuesta a corrosión.

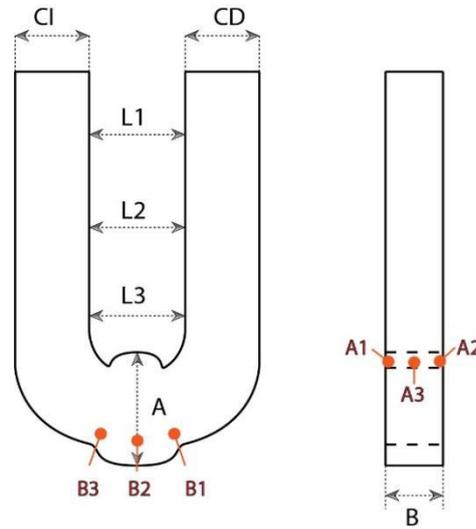


Figura 2.17. Esquema de la probeta para la toma de datos.
(Fuente: Propia)

2.4.3. Procedimiento para medición de masa

Se protege las áreas que no van a estar expuestas a corrosión con cinta aislante y se distribuyen las probetas en un envase de polivinilo como se muestra en la figura 2.18, se añaden 1000 mL de la solución corrosiva en cada recipiente con el fin de cubrir completamente el área expuesta a corrosión.



Figura 2.18. Disposición de las probetas para ensayo de corrosión.
(Fuente: Propia)

El ensayo se realiza en un laboratorio para tener control sobre las condiciones ambientales y evitar su influencia sobre el ensayo, se toman los datos de humedad, temperatura y presión al inicio y final de cada ciclo de exposición con ayuda de un termohigrómetro de las características que se muestran en la tabla 2.6.

Tabla 2.6. Características del termohigrómetro.

TERMOHIGRÓMETRO	
Marca	PCE-THB 40
Rangos de medición	
Temperatura	0 a 50 [°C]
Humedad relativa del aire	10 a 90 [% H.r].
Presión barométrica	10 a 1100 [hPa]
Resolución	
Temperatura	0,1 [°C]
Humedad relativa del aire	0,1% [H.r]
Presión barométrica	0,1 [hPa] a 1000 [hPa]
Precisión	
Temperatura	±0,8 [°C]
Humedad relativa del aire	±4 % [H.r] del valor medido ±1 % [H.r].
Presión barométrica	±2 [hPa] a 1000 [hPa], sino ±3 [hPa]



(Fuente: Propia)

La medición del pH de la solución corrosiva se realiza una medición al inicio del ensayo y al finalizar cada ciclo con el fin de observar las propiedades de la solución y su influencia en la corrosión, se emplea el equipo que se muestra en la tabla 2.7.

Tabla 2.7. Características del medidor de pH.

Medidor de pH portátil pH 3110	
Marca	WTW ProfiLine
Rangos de medición	
pH:	-2,0 a +19,9 [pH]
Precisión:	0,01 [pH]
Temperatura:	-5 a 105 [°C]



(Fuente: Propia)

El registro de la masa de las probetas se realiza con la balanza de la tabla 2.7, especificada anteriormente, con una división de escala de 0.001 [g], las masas de las probetas son tomadas cuando se encuentren completamente secas y recubiertas con la cinta aislante, se registran 3 mediciones de la masa de cada probeta y 1 medición de la probeta de referencia, la masa obtenida de cada probeta es el promedio de las tres mediciones realizadas.

Las probetas son expuestas a 10 ciclos de corrosión, con un intervalo de 24 horas, estas son divididas en dos grupos de cinco ciclos cada uno para observar la influencia de la solución corrosiva. Para cada ciclo se realiza el siguiente procedimiento de ensayo:

- Se registran las condiciones ambientales iniciales con ayuda del termohigrómetro.
- Se registra pH inicial de la solución corrosiva con el medidor de pH portátil.
- Se registra la masa inicial de cada probeta y una probeta de referencia para obtener la deriva de la balanza.
- Se ubican las probetas sobre el eje de sujeción con una separación de 2 cm entre ellas.
- Se aseguran las probetas sobre el eje para evitar contacto entre ellas.
- Se ubica el eje de sujeción en el recipiente de polivinilo para sumergir las probetas en la solución corrosiva
- Se expone las probetas a corrosión durante 24 horas.
- Al finalizar el intervalo de ensayo
- Se registran las condiciones ambientales finales con ayuda del termohigrómetro.
- Se registra pH final de la solución corrosiva con el medidor de pH portátil.
- Se retiran las probetas del recipiente y se extraen del eje de sujeción.
- Se limpia el área de exposición de las probetas con alcohol y cepillo para posterior secado.
- Se registra la medición de la masa final de las probetas y la probeta de referencia.
- Se observación de presencia picaduras y grietas en las probetas.
- Se realiza una documentación fotográfica de las probetas ensayadas donde se observen la presencia de anomalías o defectos.

En el Anexo VIII se muestra el protocolo para el ensayo de corrosión por inmersión.

2.4.4. Procedimiento para el cálculo de la tasa de corrosión

Las probetas son identificadas con las nomenclaturas detalladas en la tabla 2.8 para cada procedimiento de soldadura, se establecen tres lecturas por medición, se toma una

medición de la masa inicial y al finalizar el intervalo de exposición una medición final por probeta a ensayar.

Tabla 2.8. Nomenclatura de las probetas de ensayo de corrosión.

Procedimiento de soldadura SMAW-SMAW	Procedimiento de soldadura GTAW-SMAW
20-051 CII-01	20-051 CI-01
20-051 CII-02	20-051 CI-02
20-051 CII-03	20-051 CI-03
20-051 CII-04	20-051 CI-04
20-051 CII-05	20-051 CI-05
20-051 CII-06	20-051 CI-06

(Fuente: Propia)

La probeta número 6 de cada procedimiento de soldadura no fue inmersa a la solución corrosiva, este dato nos sirve para calcular la deriva de la balanza.

La deriva de la balanza es la diferencia que existe entre dos mediciones consecutivas en las mismas condiciones.

Se calcula la pérdida de masa W_{Di} en cada intervalo de exposición con la ecuación 2.2.

$$W_{Di} = W_i - W_{i+1} + Deriva_i$$

Ecuación 2.2

Donde:

W_{Di} : Pérdida de masa por intervalo de exposición [g]

W_i : Masa del intervalo antecesor del ensayo [g]

W_{i+1} : Masa por intervalo de exposición (24 h)[g]

$Deriva_i$: Error de la balanza al realizar 2 mediciones consecutivas por intervalo de exposición [g]

2.4.4.1. Análisis de datos experimentales

En un ensayo experimental es necesario emplear herramientas estadísticas para detectar valores atípicos en las muestras, se emplea el criterio de Chauvenet, sobre los valores obtenidos de pérdida de masa en cada intervalo.

2.4.4.2. Pérdida de masa acumulada

Para obtener W_{Ai} empleamos la ecuación 2.3.

$$W_{Ai} = W_{Di} + W_{D i-1}$$

Ecuación 2.3

Donde:

W_{Ai} : Pérdida de masa acumulada por intervalo de exposición [g]

W_{Di} : Pérdida de masa por intervalo de exposición [g]

W_{Di-1} : Pérdida de masa por intervalo de exposición anterior [g]

2.4.4.3. Cálculo de la tasa de corrosión

Se emplea la ecuación 1.1, mostrada en la sección 1.3.4, para el cálculo de la tasa de corrosión, el cálculo del área expuesta es calculada con la herramienta de CAD en combinación con los datos tomados de las probetas.

2.4.5. Ensayo Macrográfico

Para este apartado se realiza un registro fotográfico, después de cada intervalo de exposición a la solución corrosiva, para dimensionar el avance de la corrosión se añade una regla junto a la probeta, este procedimiento se realiza para cada probeta ensayada.

2.4.6. Ensayo Micrográfico

El ensayo entrega información acerca de las microestructuras presentes en el acero a estudiar, para ello es necesario el equipo adecuado y el tratamiento adecuado a las superficies de las probetas. En la figura 2.19 se muestra el tamaño de las probetas para ensayar.

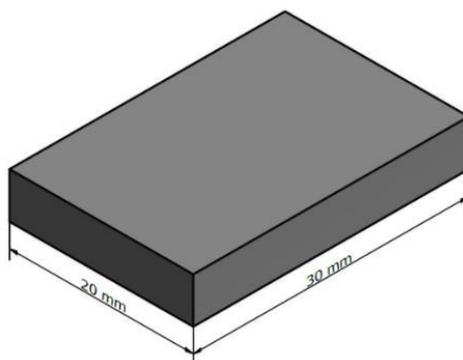


Figura 2.19. Características dimensionales para ensayo micrográfico del ensayo de corrosión.

(Fuente: Propia)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se entregan los datos obtenidos de los ensayos de caracterización del metal base, ensayos mecánicos y metalográficos después de los procedimientos de soldadura y datos obtenidos del ensayo de corrosión por inmersión realizado

3.1. Resultados

3.1.1. Caracterización del material base

Para caracterizar el material se realizaron ensayos mecánicos, químicos y metalográficos entre los ensayos mecánicos se realizó ensayos de tracción y de dureza estos resultados se detallan a continuación.

3.1.1.1. Resultados de ensayos de tracción

Resultados entregados por el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones correspondientes al ensayo de tracción del material base que se puede observar en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Resultados del ensayo de tracción.

Id.	Ancho Promedio mm	Espesor promedio mm	Carga máxima registrada		Límite de fluencia		Resistencia a la tracción		% Elongación en 50 mm
			Lbf	N	Ksi	MPa	Ksi	MPa	
M20.079.13	38,05	7,95	40 232	178 959	73,8	509,0	85,8	592,7	22,8
M20.079.14	38,09	7,84	37 263	165 754	67,4	464,7	80,5	556,1	36,2

(Fuente: Propia)

Se obtiene el límite de fluencia y la resistencia a la tracción de las probetas M20.079.13 y M20.019.14, estos resultados se comparan con los límites máximos y mínimos de los valores requeridos en la tabla 3-B de la norma API 5L, en la figura 3.1 a se muestra la comparación del límite de fluencia y en la figura 3.2 la comparación de la resistencia a la tracción.

Se observa que para ambas probetas ensayadas los resultados tanto del límite de fluencia como resistencia a la tracción se encuentran dentro de los límites mínimos y máximos de la norma API 5L.

A continuación en las tablas 3.2-a y 3.2-b se muestran los resultados cualitativos para el ensayo de tracción.

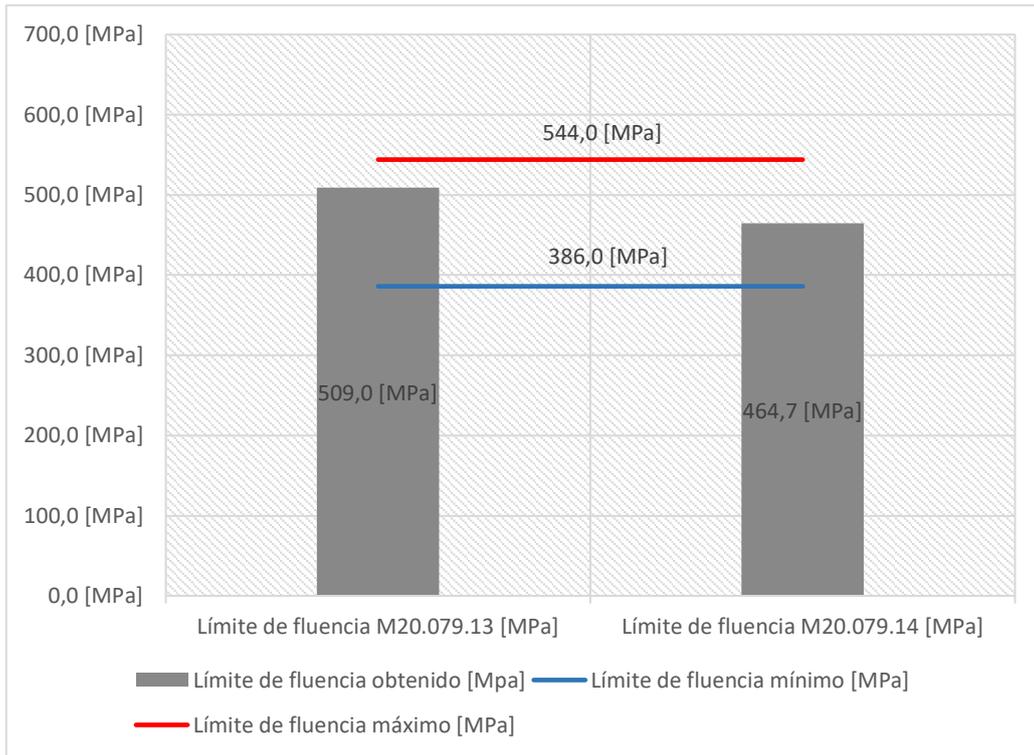


Figura 3.1. Análisis del límite de fluencia obtenido y requerido del material base.
(Fuente: Propia)

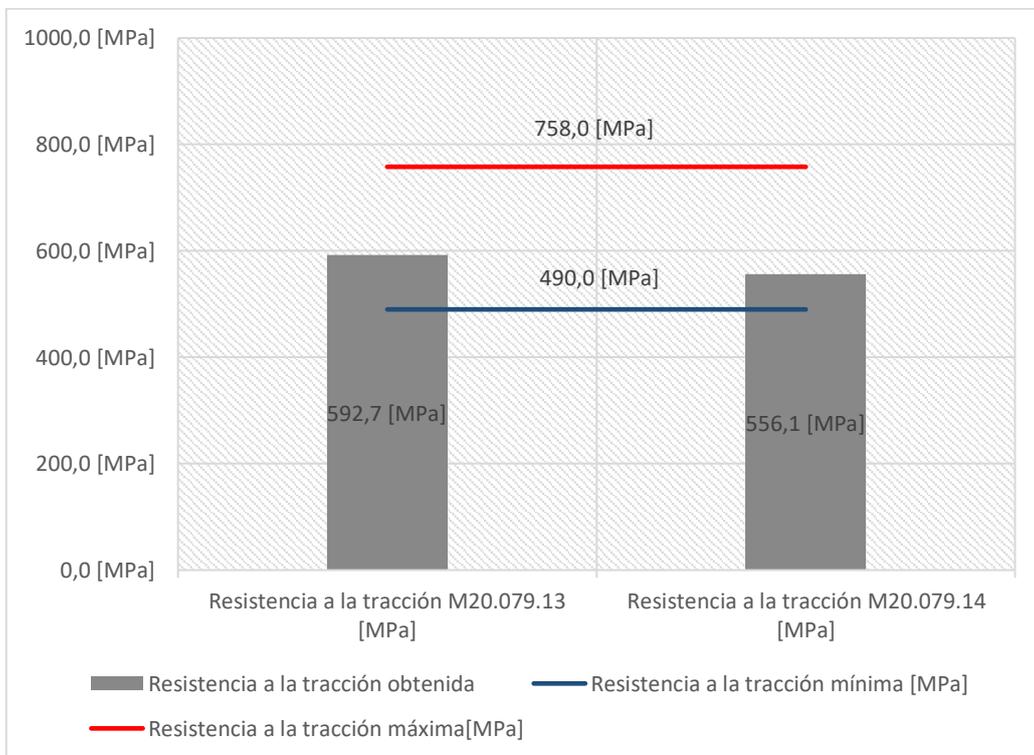


Figura 3.2. Análisis de la resistencia a la tracción del material base.
(Fuente: Propia)

Tabla 3.2-a. Resultados cualitativos para límite de fluencia de las probetas M20.079.13 y M20.019.14 en comparación con los límites máximos y mínimos de los valores requeridos en la tabla 3-B de la norma API 5L.

Identificación de probetas	Límite de fluencia obtenido [MPa]	Límite de fluencia mínimo [MPa]	Límite de fluencia máximo [MPa]	Conclusión
M20.079.13	509,0 [MPa]	386,0 [MPa]	544,0 [MPa]	CUMPLE
M20.079.14	464,7 [MPa]	386,0 [MPa]	544,0 [MPa]	CUMPLE

(Fuente: Propia)

Tabla 3.2-b. Resultados cualitativos para resistencia a la tracción de las probetas M20.079.13 y M20.019.14 en comparación con los límites máximos y mínimos de los valores requeridos en la tabla 3-B de la norma API 5L.

Identificación de probetas	Resistencia a la tracción obtenida [MPa]	Resistencia a la tracción mínima [MPa]	Resistencia a la tracción máxima [MPa]	Conclusión
M20.079.13	592,7 [MPa]	490,0 [MPa]	758,0 [MPa]	CUMPLE
M20.079.14	556,1 [MPa]	490,0 [MPa]	758,0 [MPa]	CUMPLE

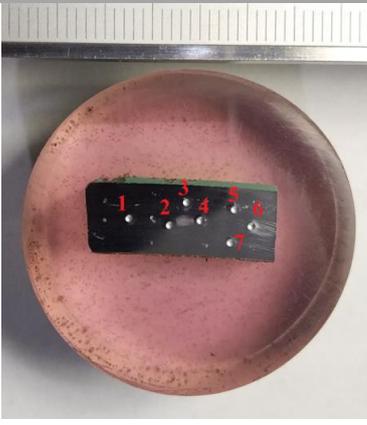
(Fuente: Propia)

3.1.1.2. Resultados de ensayos de dureza

Para el ensayo de dureza del material base se extraen dos probetas, una de la sección transversal identificada como 20-051-MB-01-T y otra de la sección longitudinal identificada como 20-051-MB-02-L, en la tabla 3.3-a se muestran los datos obtenidos para la probeta 20-051-MB-01-T y en la tabla 3.3-b los datos para la probeta 20-051-MB-02-L.

Tabla 3.3-a Resultados del ensayo de dureza para la probeta 20-051-MB-01-T

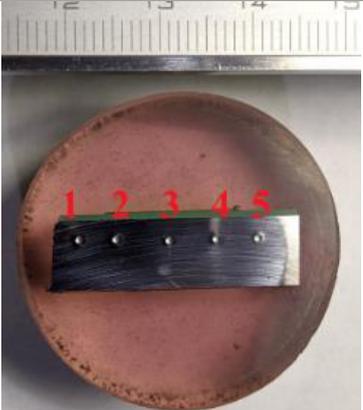
ID	20-051-MB-01-T		
1	HRB	89	13,32
2	HRB	86	15,14
3	HRB	87	13,7
4	HRB	89	14,33
5	HRB	89	14,97
6	HRB	89	14,04
7	HRB	87	13,92
PROMEDIO HRB		88,2	14,19



(Fuente: Laboratorio De Desgaste Y Falla de la Escuela Politécnica Nacional)

Tabla 3.3-b Resultados del ensayo de dureza para la probeta 20-051-MB-02-L

ID		20-051-MB-02-L	
1	HRB	88	13,71
2	HRB	88	14,33
3	HRB	88	13,63
4	HRB	87	13,84
5	HRB	87	14,13
PROMEDIO HRB		87,6	13,93



(Fuente: Laboratorio De Desgaste Y Falla de la Escuela Politécnica Nacional)

3.1.1.3. Resultados de composición química

En la tabla 3.4 se detallan los resultados de la muestra M1, del análisis por espectrometría por chispa en el Laboratorio de Fundición de la Escuela Politécnica Nacional.

Tabla 3.4 Resultados del análisis por espectrometría por chispa para la muestra M1.

Muestra M1		
Elemento		Valor [%]
Carbono	[C]	0,103
Silicio	[Si]	0,057
Manganeso	[Mn]	1,079
Fósforo	[P]	0,018
Azufre	[S]	0,013
Cromo	[Cr]	0,125
Níquel	[Ni]	0,012
Aluminio	[Al]	0,033
Niobio	[Nb]	0,021
Titanio	[Ti]	0,018
Hierro	[Fe]	98,51
Total		99,99

(Fuente: Propia)

Los datos obtenidos del porcentaje de carbono, manganeso, fósforo, azufre y titanio no superan los valores máximos de la norma por lo tanto cumplen con los requerimientos de composición química de la norma API 5L, tabla 2B, como se muestra en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Datos cualitativos del ensayo químico bajo los requerimientos de la composición para tubería API 5L X56 grado PSL 2.

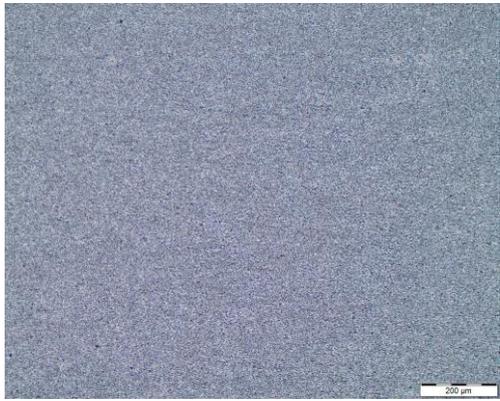
DATOS OBTENIDOS		REQUERIMIENTO	
Elemento	Valor [%]	Valor [%]	CUMPLE / NO CUMPLE
Carbono	0,103	0,240	CUMPLE
Manganeso	1,079	1,400	CUMPLE
Fósforo	0,018	0,025	CUMPLE
Azufre	0,013	0,015	CUMPLE
Titanio	0,018	0,040	CUMPLE

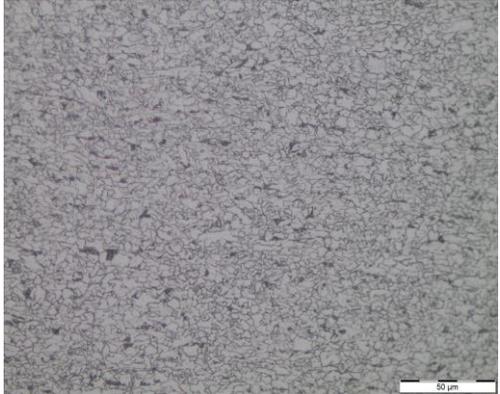
(Fuente: Propia)

3.1.1.4. Resultados de ensayo metalográfico del material base

Las metalografías del material base fueron realizadas en el Laboratorio De Desgaste Y Falla de la Escuela Politécnica Nacional y se obtuvieron los siguientes resultados presentados en la tabla 3.6.

Tabla 3.6 Resultados del análisis metalográfico del material base.

Código	Aumento	Imagen	Descripción	Detalle
20-051-MB-01-T	X100		Probeta de material base, sección transversal sin ataque químico.	Presencia de inclusiones no metálicas.
20-051-MB-01-T	X100		Probeta de material base, sección transversal con ataque químico.	Se observa la presencia de una matriz ferrítico - perlítica.

<p>20-051- MB-01-T</p>	<p>X500</p>		<p>Probeta de material base, sección transversal con ataque químico.</p>	<p>Presencia de ferrita superior a la perlita.</p>
<p>20-051- MB-02-L</p>	<p>X100</p>		<p>Probeta de material base, sección transversal sin ataque químico.</p>	<p>Presencia de inclusiones no metálicas.</p>
<p>20-051- MB-02-L</p>	<p>X100</p>		<p>Probeta de material base, sección transversal con ataque químico.</p>	<p>Se aprecia la dirección de laminado y la presencia de una matriz ferrítico - perlítica.</p>
<p>20-051- MB-02-L</p>	<p>X100</p>		<p>Probeta de material base, sección transversal con ataque químico.</p>	<p>Se observa mayor presencia de perlita con respecto a la sección transversal .</p>

(Fuente: Laboratorio De Desgaste Y Falla de la Escuela Politécnica Nacional)

3.1.2. Procedimiento de soldadura SMAW-SMAW

En el procedimiento de soldadura se añade calor, el cual puede ser determinado mediante ecuación 3.1 (AWS D1.1), que relaciona las variables controladas durante todo el proceso, el aporte de calor es un factor que tiene influencia en las propiedades de la soldadura.

A continuación se calcula el calor de entrada para el de pase de raíz del procedimiento SMAW-SMAW.

$$Q = \frac{V * A * 60}{S * 1000}$$

Ecuación 3.1

$$Q = \frac{24,4[V] * 90[A] * 60}{104,08 \left[\frac{\text{mm}}{\text{min}} \right] * 1000}$$

$$Q = 1,27 \left[\frac{\text{KJ}}{\text{mm}} \right]$$

Donde:

$$Q = \text{Calor de entrada} \left[\frac{\text{KJ}}{\text{mm}} \right]$$

$$V = 24,4 [V]$$

$$A = 90 [A]$$

$$S = 104,08 \left[\frac{\text{mm}}{\text{min}} \right]$$

En la Tabla 3.7 se muestran los valores de voltaje, amperaje, velocidad de avance y se calcula el calor de entrada para cada pase.

Tabla 3.7. Parámetros para cada pase del procedimiento de soldadura SMAW-SMAW.

Procedimiento	Electrodo	Pase	Voltaje [V]	Amperaje [A]	Vel. Avance [mm/min]	Calor entrada Q [KJ/mm]
SMAW	E7010	Raíz	24,4	90	104,08	1,27
SMAW	E7010	Caliente	30	100	111,86	1,61
SMAW	E7018	Relleno	23	81	110,00	1,02

(Fuente: Propia)

3.1.2.1. Resultado de ensayo de tracción de probetas soldadas

En la tabla 3.8 se presentan los datos obtenidos para el ensayo de tracción de las probetas soldadas con procedimiento SMAW-SMAW, estos datos se extraen del informe emitido por el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones Anexo IX.

Tabla 3.8. Ensayo de tracción de juntas soldadas procedimiento SMAW-SMAW.

Identificación	Ancho	Espesor	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		Obs.
	Promedio mm	Promedio mm	lbf	N	Ksi	Mpa	
20-051-IIA-11 TT	26,85	7,78	25 134	111 800	76,5	535,2	FJS
20-051-IIB-11 TT	25,56	7,90	24 398	108 530	78,0	537,5	FMB
20-051-IIC-11 TT	26,30	7,79	24 782	110 238	78,0	538,1	FMB
20-051-IID-11 TT	25,50	7,81	24 184	107 576	78,3	540,2	FMB

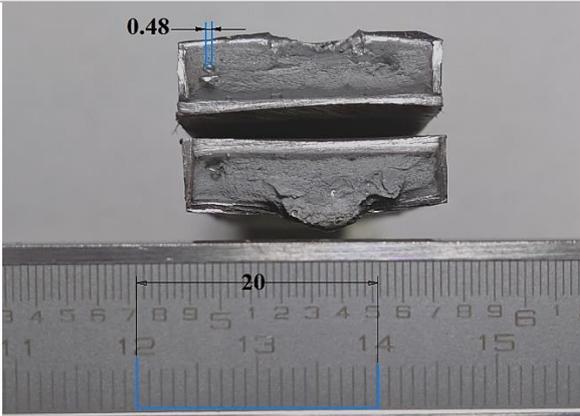
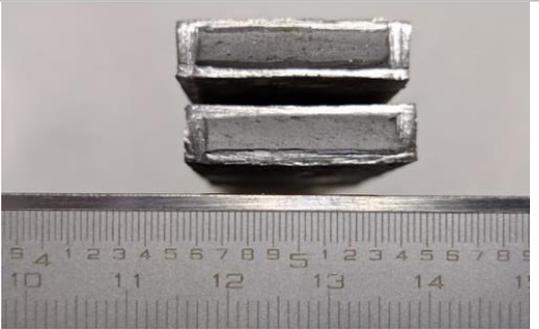
*FMB = Falla en el material base *FJS = Falla en la junta soldada

(Fuente: Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Escuela Politécnica Nacional)

3.1.2.2. Resultado de ensayo Nick-Break

Los resultados y observaciones del ensayo Nick-Break realizado en las probetas del proceso SMAW-SMAW se muestran en la tabla 3.9.

Tabla 3.9. Resultados y observaciones del ensayo Nick-Break.

<p style="text-align: center;">20-051-IIA-III-NB</p> 	<p style="text-align: center;">20-051-IIB-III-NB</p> 
<p style="text-align: center;">Porosidad aceptable de 0.48 mm de diámetro.</p>	<p style="text-align: center;">No se observa discontinuidades.</p>
<p style="text-align: center;">20-051-IIC-III-NB</p> 	<p style="text-align: center;">20-051-IID-III-NB</p> 
<p style="text-align: center;">No se observa discontinuidades.</p>	<p style="text-align: center;">No se observa discontinuidades.</p>

(Fuente: Laboratorio de Soldadura de la Escuela Politécnica Nacional)

3.1.2.3. Resultado de ensayo de doblado de cara y raíz

Los resultados y observaciones para probetas del proceso SMAW-SMAW de los ensayos de doblado de cara se muestran en la tabla 3.10-a y ensayos de doblado de raíz en la tabla 3.10-b.

Tabla 3.10-a. Resultados y observaciones del ensayo de doblado de cara.

20-051-IIA-I-DC	20-051-IIB-I-DC
	
No se observa discontinuidades.	No se observa discontinuidades.
20-051-IIC-I-DC	20-051-IID-I-DC
	
No se observa discontinuidades.	No se observa discontinuidades.

(Fuente: Laboratorio de Soldadura de la Escuela Politécnica Nacional)

Tabla 3.10-b. Resultados y observaciones del ensayo de doblado de raíz.

20-051-IIA-IV-DR	20-051-IIB-IV-DR
	
No se observa discontinuidades.	No se observa discontinuidades.
20-051-IIC-IV-DR	20-051-IID-IV-DR
	
No se observa discontinuidades.	Imperfecciones aceptables de 1.05 mm y 1.226 mm de longitud.

(Fuente: Laboratorio de Soldadura de la Escuela Politécnica Nacional)

3.1.2.4. Resultado de ensayo de dureza

En la figura 3.3 se muestran las posiciones de las cuales se tomaron las medidas de dureza, estas posiciones incluyen el material base, la ZAC y los diferentes pases de soldadura, en la Tabla 3.11 se detallan los datos obtenidos en las diferentes posiciones mostradas en la figura 3.3.

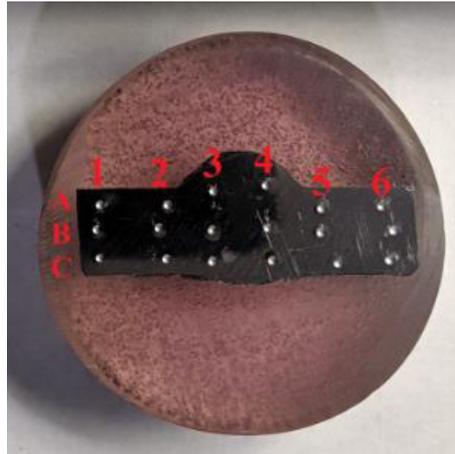


Figura 3.3. Posiciones de las cuales se tomaron las medidas de dureza.
 (Fuente: Laboratorio De Desgaste Y Falla de la Escuela Politécnica Nacional)

Tabla 3.11. Datos de dureza obtenidos de las diferentes posiciones.

POSICIÓN	IDENTIFICACIÓN	1	2	3	4	5	6
A	20-051 SMAW 01	90 HRB	88 HRB	93 HRB	93 HRB	86 HRB	89 HRB
	20-051 SMAW 02	92 HRB	93 HRB	87 HRB	94 HRB	85 HRB	88 HRB
B	20-051 SMAW 01	90 HRB	88 HRB	93 HRB	93 HRB	86 HRB	89 HRB
	20-051 SMAW 02	88 HRB	89 HRB	93 HRB	93 HRB	85 HRB	89 HRB
C	20-051 SMAW 01	92 HRB	93 HRB	87 HRB	94 HRB	85 HRB	88 HRB
	20-051 SMAW 02	87 HRB	88 HRB	82 HRB	91 HRB	83 HRB	90 HRB
20-051-SMAW-01				20-051-SMAW-02			

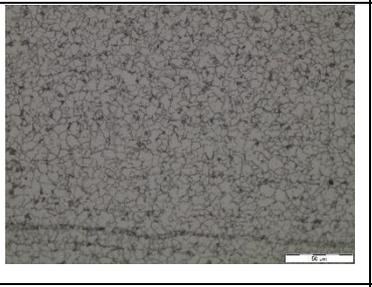
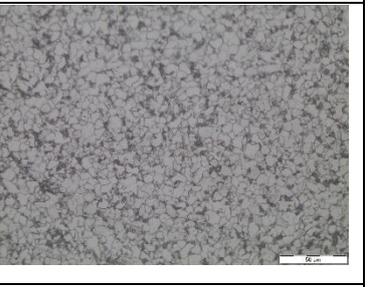
(Fuente: Laboratorio De Desgaste Y Falla de la Escuela Politécnica Nacional)

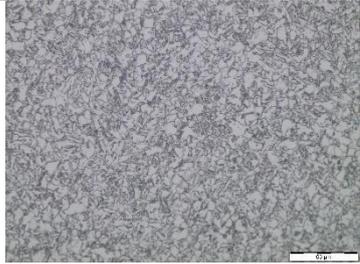
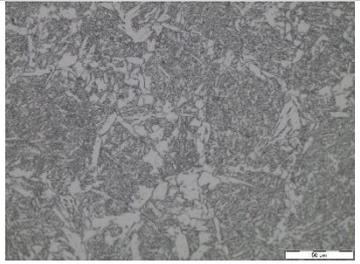
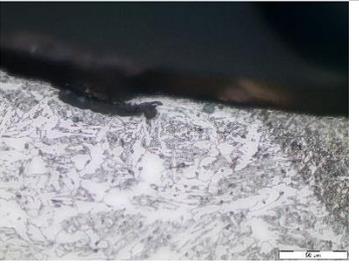
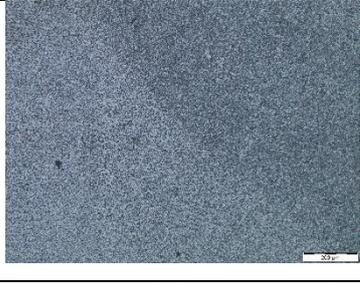
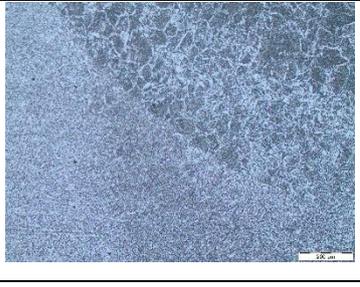
3.1.2.5. Resultado de ensayo Micrográfico

El ensayo micrográfico consta de varias fotografías tomadas por un microscopio con aumentos X100 y X500, en las cuales se muestra la superficie de la soldadura tanto en la cara como en la raíz, esto facilita el análisis de la microestructura en cada parte del cordón

de soldadura. Este registro fotográfico se realizó sin ataque químico y con ataque químico (Nital 10%) los resultados se aprecian en la tabla 3.12 y el Anexo XI.

Tabla 3.12. Registro fotográfico del ensayo micrográfico con aumentos X100 y X500.

20-051-SMAW-01		
X500 sin ataque químico		
Material base	ZAC	Material de Aporte
		
No se observa discontinuidades.	Se observa pequeñas picaduras en la ZAC.	Presencia de corrosión por agrietamiento.
X500 sin ataque químico		
Material base	ZAC	Material de Aporte
		
Presencia de corrosión por agrietamiento.	Presencia de picaduras en la ZAC.	Presencia de inclusiones no metálicas.
X500 con ataque químico		
Material base	ZAC	Primer pase
		
Presencia de una matriz ferrítico -perlítica.	Aumento del tamaño del grano en la matriz ferrítico -perlítica, mayor presencia de perlita.	Aumento del tamaño del grano en la matriz ferrítico -perlítica, mayor presencia de perlita.

Segundo pase	Tercer pase	Tercer pase y ZAC
		
Mayor presencia de perlita y cambio en la estructura de la ferrita.	Aumento de perlita y presencia de ferrita Widmanstatten, acicular y alitromórfica.	Presencia de ferrita Widmanstatten, acicular y alitromórfica.
X100 con ataque químico		
Material base	ZAC	ZAC y primer pase
		
Presencia de una matriz ferrítico-perlítica. No se observa discontinuidades	Presencia de una matriz ferrítico-perlítica con aumento del tamaño del grano. No se observa discontinuidades	Matriz ferrítico-perlítica con mayor presencia de perlita y una disminución en el tamaño del grano de la ferrita.
ZAC primer y segundo pase	ZAC segundo y tercer pase	
		
Aumento del tamaño del grano en la matriz ferrítico-perlítica, mayor presencia de perlita.	Aumento de perlita y presencia de ferrita Widmanstatten, acicular y alitromórfica.	

(Fuente: Laboratorio De Desgaste Y Falla de la Escuela Politécnica Nacional)

3.1.2.6. Resultado de ensayo Macrográfico

El ensayo macrográfico de las probetas soldadas con procedimiento SMAW-SMAW, se realizó una vez concluido el ensayo micrográfico con ataque químico de Nital al 10% y un aumento de 0.63X, en el cual se aprecian las partes del cordón de soldadura que se detallan en la tabla 3.13.

Tabla 3.13. Registro fotográfico del ensayo macrográfico con aumento de 0.63X.

20-051-SMAW 01	20-051-SMAW 02
	
<p>Se aprecia el material base, la ZAC, el pase raíz, el pase en caliente y los diferentes pases de relleno, no se observa discontinuidades en ninguna de las zonas nombradas.</p>	<p>Se aprecia el material base, la zona afectada por el calor, el pase raíz, el pase en caliente y los diferentes pases de relleno, no se observa discontinuidades en ninguna de las zonas nombradas.</p>

(Fuente: Laboratorio De Desgaste Y Falla de la Escuela Politécnica Nacional)

3.1.3. Procedimiento de soldadura GTAW-SMAW

En el procedimiento de soldadura se añade calor como ya se detalló en la sección 3.1.2., para el proceso GTAW-SMAW se realiza el cálculo del calor de entrada y se presentan los resultados en la tabla 3.14.

A continuación se calcula el calor de entrada para el de pase de raíz del procedimiento GTAW-SMAW, con la ecuación 3.1.

$$Q = \frac{V * A * 60}{S * 1000}$$

$$Q = \frac{9,7[V] * 73,2[A] * 60}{27,86 \left[\frac{\text{mm}}{\text{min}} \right] * 1000}$$

$$Q = 1,53 \left[\frac{\text{KJ}}{\text{mm}} \right]$$

Donde:

$$Q = \text{Calor de entrada} \left[\frac{\text{KJ}}{\text{mm}} \right]$$

$$V = 9,7 \text{ [V]}$$

$$A = 73,2 \text{ [A]}$$

$$S = 27,86 \left[\frac{\text{mm}}{\text{min}} \right]$$

Tabla 3.14. Valores obtenidos del procedimiento de soldadura GTAW-SMAW.

Proceso	Material de aporte/ electrodo	Pase	Voltaje [V]	Amperaje [A]	Vel. Avance [mm/min]	Calor entrada Q [KJ/mm]
GTAW	ER80S	Raíz	9,7	73,2	27,86	1,53
GTAW	ER80S	Caliente	10	100	56,24	1,07
SMAW	E7018	Relleno	22,5	84	88,95	1,27

(Fuente: Propia)

3.1.3.1. Resultado de ensayo de tracción de probetas soldadas

En la tabla 3.15 se presentan los datos obtenidos para el ensayo de tracción de las probetas soldadas con procedimiento GTAW-SMAW, estos datos se extraen del informe emitido por el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones Anexo IX.

Tabla 3.15. Ensayo de tracción de juntas soldadas procedimiento GTAW-SMAW.

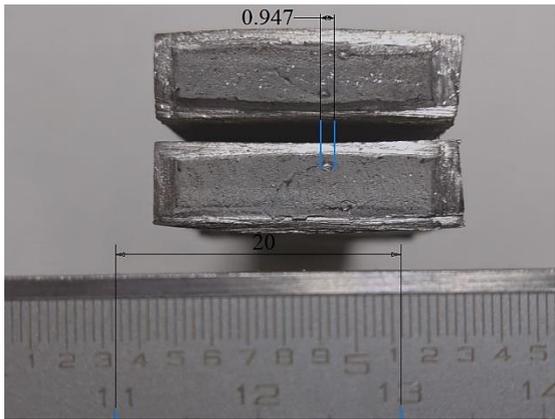
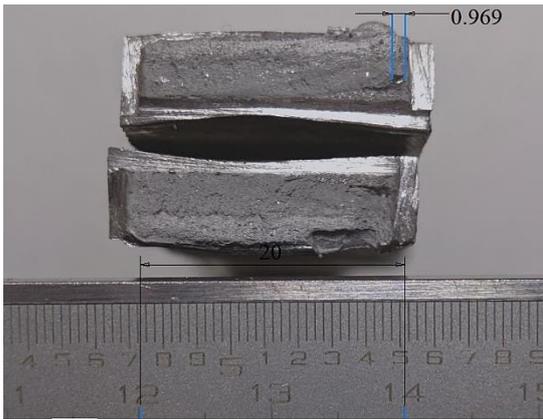
Identificación	Ancho	Espesor	Carga máxima		Resistencia a		Obs.
	Promedio	Promedio	registrada	la tracción	la tracción		
	mm	mm	lbf	N	Ksi	Mpa	
20-051-IA-11 TT	24,96	7,92	24 548	109 195	80,1	552,4	FMB
20-051-IB-11 TT	26,39	7,86	24 692	109 834	76,8	529,5	FMB
20-051-IC-11 TT	25,76	7,85	24 909	110 801	79,5	547,9	FMB
20-051-ID-11 TT	26,44	7,90	24 711	109 918	76,3	526,2	FMB
*FMB = Falla en el material base *FJS = Falla en la junta soldada							

(Fuente: Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Escuela Politécnica Nacional)

3.1.3.2. Resultado de ensayo Nick-Break

Los resultados y observaciones del ensayo Nick-Break realizado en las probetas del proceso GTAW-SMAW se muestran en la tabla 3.16.

Tabla 3.16. Resultados y observaciones de los ensayos Nick-Break.

20-051-IA-III-NB	20-051-IB-III-NB
	
<p>Porosidad aceptable de 0.947 mm de diámetro.</p>	<p>Porosidad aceptable de 0.969 mm de diámetro.</p>
20-051-IC-III-NB	20-051-ID-III-NB
	
<p>No se observa discontinuidades.</p>	<p>No se observa discontinuidades.</p>

(Fuente: Laboratorio de Soldadura de la Escuela Politécnica Nacional)

3.1.3.3. Resultado de ensayo de doblado

Los resultados y observaciones para probetas del proceso GTAW-SMAW de los ensayos de doblado de cara se muestran en la tabla 3.17-a y ensayos de doblado de raíz en la tabla 3.17-b.

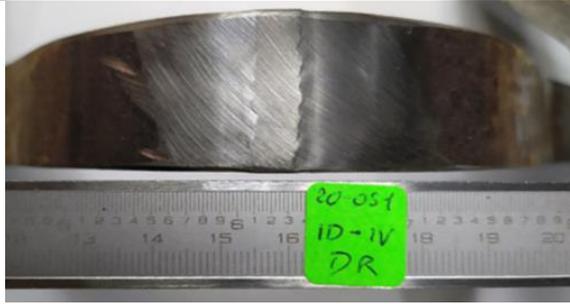
Tabla 3.17-a. Resultados y observaciones del ensayo de doblado de cara.

20-051-IA-I-DC	20-051-IB-I-DC
	
No se observa discontinuidades.	No se observa discontinuidades.
20-051-IC-I-DC	20-051-ID-I-DC
	
No se observa discontinuidades.	No se observa discontinuidades.

(Fuente: Laboratorio de Soldadura de la Escuela Politécnica Nacional)

Tabla 3.17-b. Resultados y observaciones del ensayo de doblado de raíz.

20-051-IA-IV-DR	20-051-IB-IV-DR
	
No se observa discontinuidades.	No se observa discontinuidades.

20-051-IC-IV-DR	20-051-ID-IV-DR
	
No se observa discontinuidades.	No se observa discontinuidades.

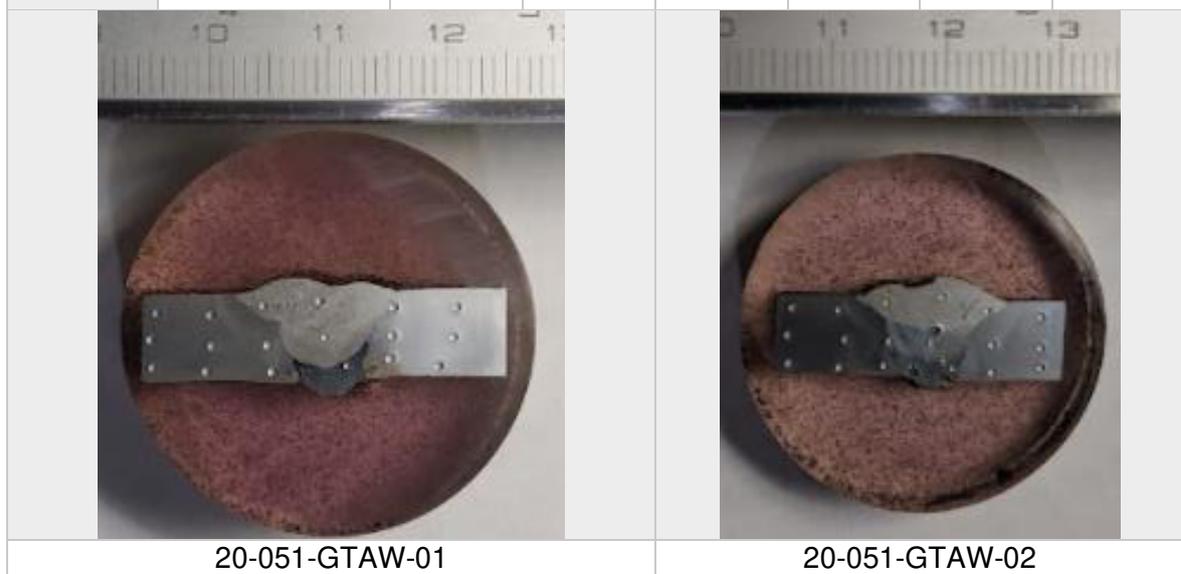
(Fuente: Laboratorio de Soldadura de la Escuela Politécnica Nacional)

3.1.3.4. Resultado de ensayo de dureza

En la figura 3.4 se muestran las posiciones de las cuales se tomaron las medidas de dureza en la probeta con procedimiento de soldadura GTAW-SMAW, estas posiciones incluyen el material base, la ZAC y los diferentes pases de soldadura, en la tabla 3.18 se detallan los datos obtenidos en las diferentes posiciones mostradas en la figura 3.4.

Tabla 3.18. Datos de dureza obtenidos de las diferentes posiciones.

POSICIÓN	IDENTIFICACIÓN	1	2	3	4	5	6
A	20-051 GTAW 01	91 HRB	95 HRB	93 HRB	94 HRB	98 HRB	91 HRB
	20-051 GTAW 02	88 HRB	88 HRB	86 HRB	96 HRB	93 HRB	93 HRB
B	20-051 GTAW 01	93 HRB	85 HRB	91 HRB	90 HRB	92 HRB	97 HRB
	20-051 GTAW 02	89 HRB	88 HRB	91 HRB	94 HRB	22 HRC	86 HRB
C	20-051 GTAW 01	93 HRB	91 HRB	90 HRB	94 HRB	90 HRB	32 HRC
	20-051 GTAW 02	90 HRB	85 HRB	67 HRB	79 HRB	14 HRC	32 HRC



(Fuente: Laboratorio De Desgaste Y Falla de la Escuela Politécnica Nacional)

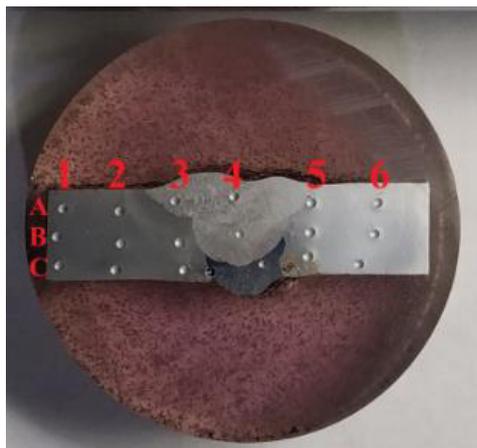


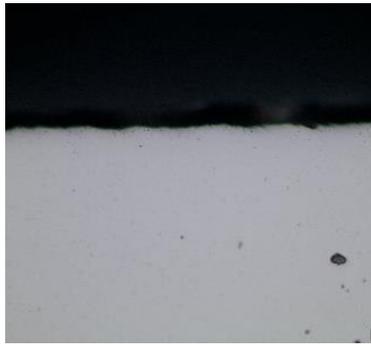
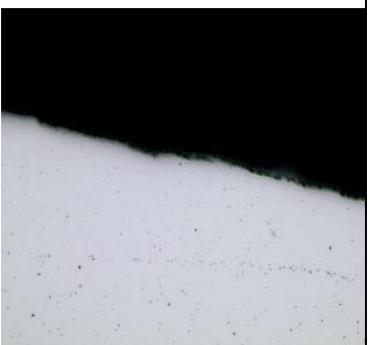
Figura 3.4. Posiciones de las cuales se tomaron las medidas de dureza.
 (Fuente: Laboratorio De Desgaste Y Falla de la Escuela Politécnica Nacional)

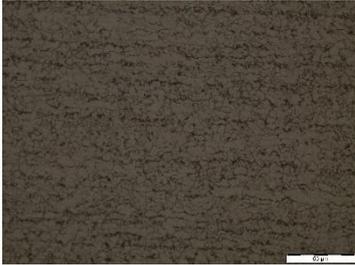
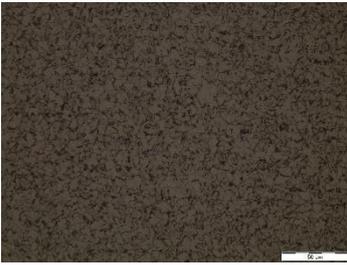
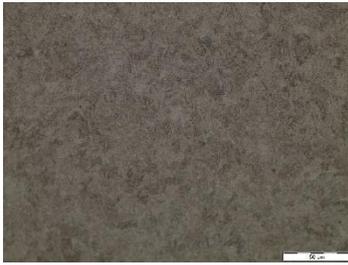
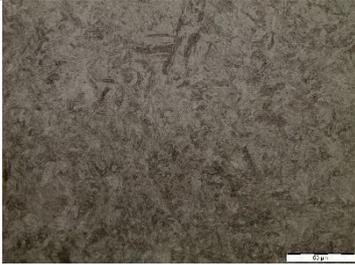
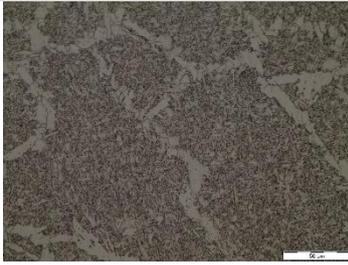
3.1.3.5. Resultado de ensayo Micrográfico

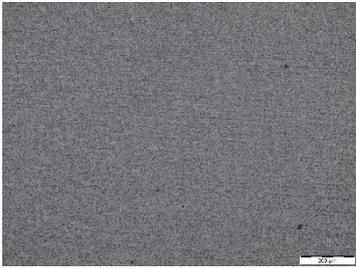
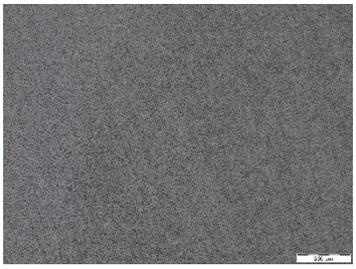
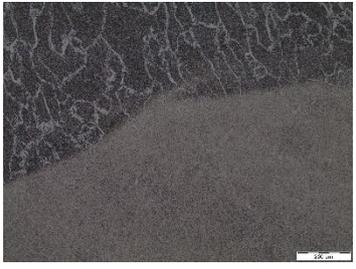
En la tabla 3.19 se muestran las micrografías realizadas a la probeta con aumento de X100 y X500, de la cara y raíz del cordón de soldadura de procedimiento GTAW-SMAW.

Para el ataque químico en la raíz de soldadura se empleó Marble y sobre los pases de relleno Nital al 10%.

Tabla 3.19. Registro fotográfico del ensayo micrográfico con aumentos X100 y X500.

20-051-GTAW-02		
Superior X500 sin ataque químico		
ZAC	Material de Aporte	
		
Presencia de inclusiones no metálicas.	Presencia de inclusiones no metálicas.	
X500 con ataque químico		

Material base	ZAC	Primer pase
		
<p>Presencia de una matriz ferrítico-perlítica. No se observa discontinuidades</p>	<p>Presencia de una matriz ferrítico-perlítica con aumento del tamaño del grano y mayor presencia de perlita. No se observa discontinuidades</p>	<p>Presencia de una microestructura con fracción de martensita, una fracción muy pequeña de austenita debido a la presencia considerable de Mo, además se nota la presencia de ferrita acicular con una microestructura mucho más fina y pequeñas cantidades perlita.</p>
Primer y segundo pase	Segundo y tercer pase	Cuarto pase
		
<p>Aumento de la presencia de perlita y ferrita acicular</p>	<p>Presencia de una matriz ferrítico-perlítica.</p>	<p>Microestructura de perlita, ferrita Widmanstatten, acicular y alitromorfica.</p>
X100 con ataque químico		

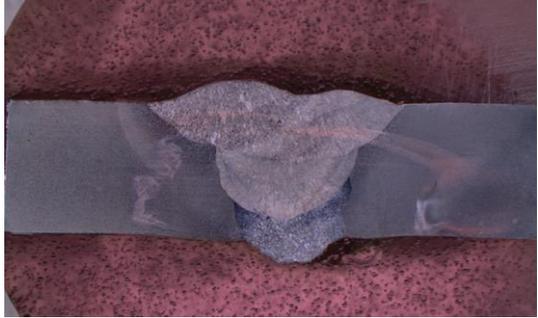
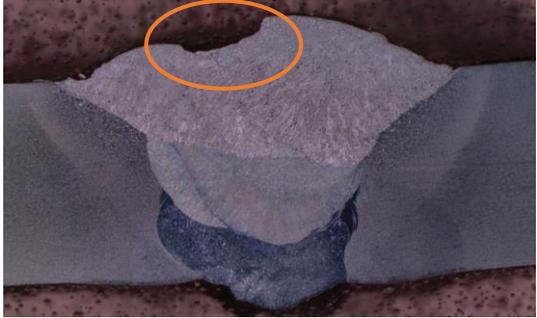
Material base	ZAC	Primer y segundo pase
		
<p>Presencia de una matriz ferrítico-perlítica. No se observa discontinuidades</p>	<p>Presencia de una matriz ferrítico-perlítica con aumento del tamaño del grano y mayor presencia de perlita. No se observa discontinuidades</p>	<p>Presencia de microestructuras como martensita, austenita, ferrita acicular y perlita.</p>
Segundo y tercer pase	Tercer y cuarto pase	
		
<p>Trancision de una matriz de martensita y austenita a una matriz ferrítico-perlítica</p>	<p>Aumenta la cantidad de perlita y existe presencia de ferrita Widmanstatten, acicular y alitromorfica.</p>	

(Fuente: Laboratorio De Desgaste Y Falla de la Escuela Politécnica Nacional)

3.1.3.6. Resultado de ensayo Macrográfico

El ensayo macrográfico de las probetas soldadas con procedimiento GTAW-SMAW, se realizan después del ensayo micrográfico con aumento de 0.40X para la probeta GTAW 01 y 0.63X para la probeta GTAW 02, los datos obtenidos se detallan en la tabla 3.20.

Tabla 3.20. Registro fotográfico del ensayo macrográfico con aumento de 0.40X para la probeta GTAW 01 y 0.63X para la probeta GTAW 02.

GTAW 01	GTAW 02
	
<p>Se aprecia el material base, la ZAC, el pase raíz, los diferentes pases de relleno, no se observa discontinuidades.</p>	<p>Se aprecia el material base, ZAC, el pase raíz y los diferentes pases de relleno, se observa la presencia de una mordedura.</p>

(Fuente: Laboratorio De Desgaste Y Falla de la Escuela Politécnica Nacional)

3.1.4. Ensayo de corrosión

Los datos obtenidos durante el ensayo de corrosión se agruparon de acuerdo con el procedimiento de soldadura para su posterior análisis.

3.1.4.1. Resultados de ensayo de corrosión en probetas con procedimiento de soldadura SMAW-SMAW

Para determinar la pérdida de masa en las probetas se realizan mediciones cada 24 horas registrando la masa inicial y final en cada intervalo de exposición a la solución corrosiva, en la tabla 3.21-a se muestran los datos de masa de las probetas con procedimiento de soldadura SMAW-SMAW hasta 120 h y en la tabla 3.21-b los datos de 144 horas a 240 horas. Cada medida de masa registrada en las tablas corresponde al promedio de 3 mediciones.

Tabla 3.21-a. Datos de masa de las probetas con procedimiento de soldadura SMAW-SMAW hasta 120 h.

Identificación	INICIAL [g]	24 [h] [g]	48 [h] [g]	72 [h] [g]	96 [h] [g]	120 [h] [g]
20-051 CII-01	593,375	590,145	589,187	588,799	588,571	588,455
20-051 CII-02	585,496	582,515	581,654	581,281	581,076	580,956
20-051 CII-03	567,047	564,118	563,349	562,989	562,821	562,724
20-051 CII-04	610,281	607,463	606,453	606,088	605,867	605,762
20-051 CII-05	630,120	627,530	626,693	626,333	626,131	626,028
20-051 CII-06	578,223	578,220	578,220	578,220	578,221	578,224
Deriva de la balanza	-----	0,002	-0,002	0,001	0,001	-0,004

(Fuente: Propia)

Tabla 3.21 -b. Datos de masa de las probetas con procedimiento de soldadura SMAW-SMAW de 144 h hasta 240 h.

Identificación	INICIAL	144 [h]	168 [h]	192 [h]	216 [h]	240 [h]
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
20-051 CII-01	588,673	588,613	588,536	588,477	588,439	588,405
20-051 CII-02	581,224	581,137	581,038	580,982	580,939	580,903
20-051 CII-03	562,910	562,855	562,794	562,754	562,724	562,704
20-051 CII-04	605,941	605,832	605,751	605,710	605,668	605,639
20-051 CII-05	626,293	626,185	626,128	626,093	626,055	626,019
20-051 CII-06	578,228	578,227	578,226	578,227	578,229	578,230
Deriva de la balanza	-----	0,000	0,002	-0,001	-0,002	-0,001

(Fuente: Propia)

Se calcula la pérdida de masa (W_D) con la ecuación 2.2 por cada intervalo de limpieza (24 horas) y se obtienen los datos mostrados en la tabla 3.22, estos datos permiten representar de manera gráfica en la figura 3.5 la pérdida de masa para cada uno de los intervalos del ensayo.

$$W_{Di} = W_i - W_{i+1} + Deriva_i$$

$$W_{D1} = W_{inicial} - W_{24h} + Deriva_{24h}$$

$$W_{D1} = 593,375 [g] - 590,145 [g] + 0.002 [g]$$

$$W_{D1} = 3,23 [g]$$

Donde:

W_{Di} : Pérdida de masa por intervalo de exposición [g]

W_i : Masa del intervalo antecesor del ensayo [g]

W_{i+1} : Masa por intervalo de exposicion (24 h)[g]

$Deriva_i$: Error de la balanza al realizar 2 mediciones consecutivas por intervalo de exposición [g]

Tabla 3.22. Pérdida de masa por intervalos de exposición en probetas con procedimiento de soldadura SMAW-SMAW.

Identificación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
W_D	[g]									
20-051 CII-01	3,233	0,956	0,388	0,229	0,112	0,060	0,080	0,058	0,036	0,033
20-051 CII-02	2,984	0,859	0,374	0,206	0,116	0,087	0,101	0,056	0,040	0,035
20-051 CII-03	2,931	0,767	0,360	0,169	0,094	0,054	0,063	0,040	0,028	0,020
20-051 CII-04	2,820	1,008	0,366	0,222	0,101	0,109	0,083	0,040	0,040	0,029
20-051 CII-05	2,592	0,835	0,360	0,203	0,099	0,107	0,060	0,034	0,036	0,036

(Fuente: Propia)

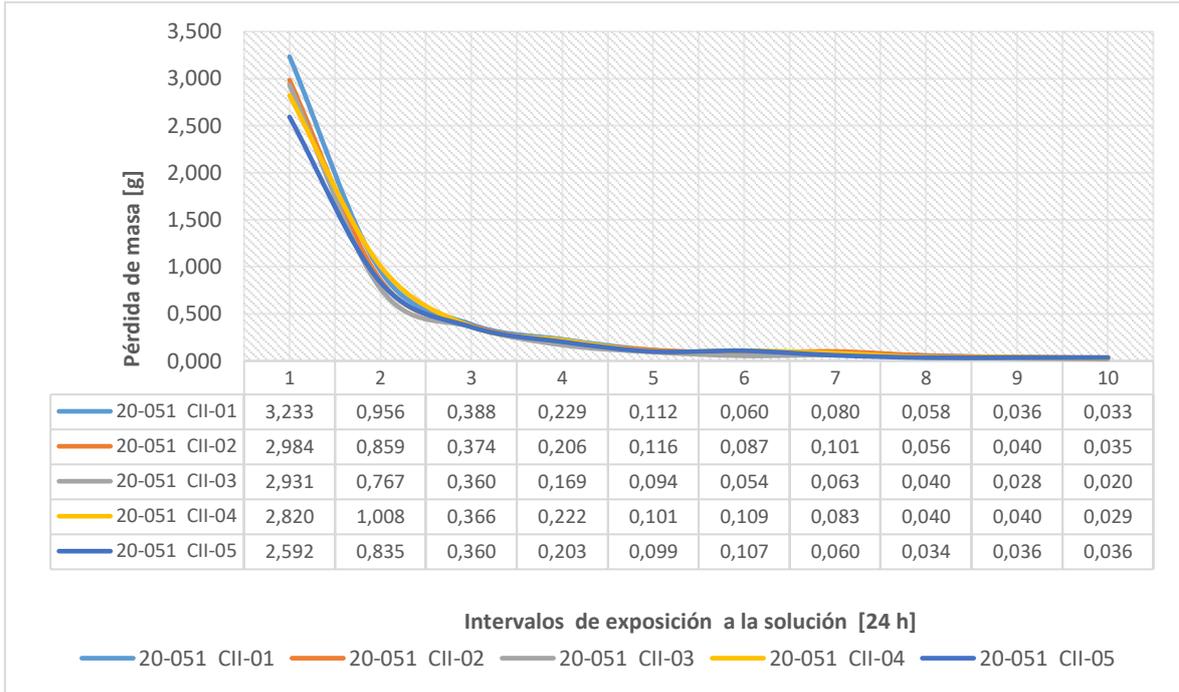


Figura 3.5. Pérdida de masa en probetas con procedimiento de soldadura SMAW-SMAW.
(Fuente: Propia)

Los datos experimentales de la diferencia de pérdida de masa (W_D) se analizan para observar datos atípicos en las muestras, estos son analizados bajo el Criterio de Chauvenet, que relaciona la diferencia entre el dato de análisis, la media y la desviación estándar, como se muestra la ecuación 3.2, el resultado de esta relación es comparado con el coeficiente de Chauvenet para una muestra $n = 5$, para el caso de que esta relación sea mayor al coeficiente se determina que esta es un valor atípico en una muestra y queda a criterio del observador si son retirados del estudio de corrosión.

En la tabla 3.23 se muestran los datos cualitativos obtenidos al aplicar el criterio de Chauvenet para las probetas con procedimiento SMAW-SMAW.

$$\text{Criterio de Chauvenet} = \frac{W_{Dij} - M_j}{\sigma_j}$$

Ecuación 3.2

$$\frac{W_{Dij} - M_j}{\sigma_j} < K_C$$

Donde:

W_{Dij} = Diferencia de pérdida de masa [$i = 1, \dots, 5; j = 1, \dots, 10$]

M_j = Media aritmética de la diferencia de masa por intervalo [$j = 1, \dots, 10$]

σ_j = Desviación estandar por intervalo [$j = 1, \dots, 10$]

K_C = Coeficiente de Chauvenet para $n = 5$; $K_C = 1,65$

Tabla 3.23. Datos cualitativos obtenidos al aplicar el criterio de Chauvenet para las probetas con procedimiento SMAW-SMAW.

Identificación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20-051 CII-01	SI									
20-051 CII-02	SI									
20-051 CII-03	SI									
20-051 CII-04	SI									
20-051 CII-05	SI									
*Se considera la evaluación cualitativa "SI" cuando el criterio de Chauvenet calculado es menor que K_C , de lo contrario la evaluación cualitativa es "NO"										

(Fuente: Propia)

Se obtiene la pérdida de masa acumulada (W_A) con la ecuación 2.3, para cada intervalo de 24 horas, durante el tiempo de ensayo (240 horas), los resultados son presentados en la tabla 3.24. La figura 3.6 presenta la pérdida de masa acumulada en función del tiempo para cada probeta del procedimiento de soldadura SMAW-SMAW.

Tabla 3.24. Pérdida de masa acumulada para cada intervalo de 24 horas, durante el tiempo de ensayo (240 horas).

Identificación	0 h	24 h	48 h	72 h	96 h	120 h	144 h	168 h	192 h	216 h	240 h
	[g]										
20-051 CII-01	0,000	3,233	4,189	4,577	4,807	4,919	4,979	5,058	5,116	5,152	5,186
20-051 CII-02	0,000	2,984	3,843	4,217	4,423	4,539	4,626	4,727	4,782	4,823	4,858
20-051 CII-03	0,000	2,931	3,699	4,059	4,228	4,321	4,376	4,439	4,478	4,506	4,526
20-051 CII-04	0,000	2,820	3,828	4,194	4,416	4,517	4,626	4,709	4,749	4,788	4,817
20-051 CII-05	0,000	2,592	3,427	3,788	3,991	4,090	4,197	4,257	4,291	4,327	4,362

(Fuente: Propia)

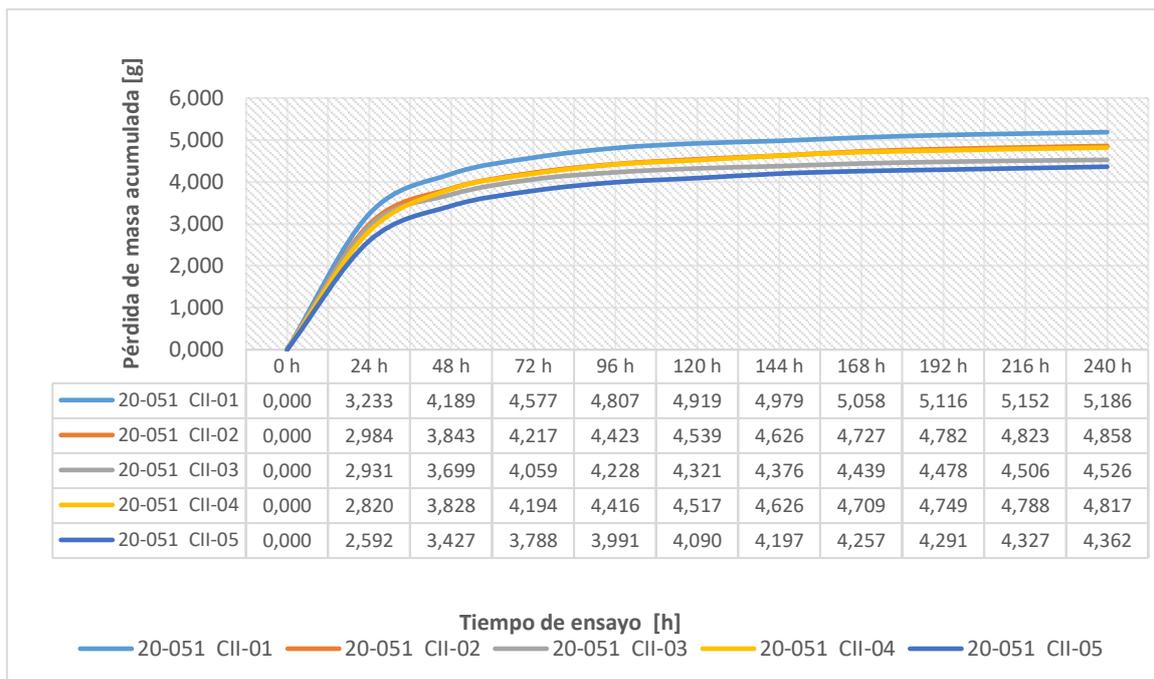


Figura 3.6. Pérdida de masa acumulada en probetas con procedimiento de soldadura SMAW-SMAW.

(Fuente: Propia)

El área de exposición (A_T) de la solución corrosiva está dado bajo el promedio de 3 mediciones diferentes el resultado se encuentra en la tabla 3.25.

Tabla 3.25. Área de exposición de la solución corrosiva.

Identificación	A_T [mm ²]	A_T [cm ²]
20-051 CII-01	2087,36	20,87
20-051 CII-02	2138,51	21,39
20-051 CII-03	1965,21	19,65
20-051 CII-04	2288,97	22,89
20-051 CII-05	2242,26	22,42
*El resultado es el promedio de 3 mediciones realizadas		

(Fuente: Propia)

La tasa de corrosión (CR) se calcula con la ecuación 1.1, los datos obtenidos de las probetas del procedimiento de soldadura SMAW-SMAW son presentados en la tabla 3.26, a continuación se presenta el cálculo de la tasa de corrosión (CR) calculada para la probeta con procedimiento SMAW-SMAW, identificación 20-051 CII-01.

$$CR = \frac{K \times W_A}{A_T \times T \times D}$$

$$CR = \frac{(8.76 \times 10^4 \left[\frac{mm}{año} \right]) \times (5.186 [g])}{(20,874 [cm^2]) \times (240 [h]) \times (7.85 \left[\frac{g}{cm^3} \right])}$$

$$CR = 11,55 \left[\frac{mm}{año} \right]$$

Donde:

$K = 8,76 \times 10^4 \left[\frac{mm}{año} \right]$; constante de conversión de unidades

$T = 240 [h]$; tiempo de exposición del ensayo.

$D = 7,85 \left[\frac{g}{cm^3} \right]$; Densidad correspondiente del acero al carbono.

Tabla 3.26. Tasa de corrosión de las probetas del procedimiento de soldadura SMAW-SMAW.

IDENTIFICACIÓN DE PROBETAS SMAW-SMAW	W _A [g]	A _T [cm ²]	TASA DE CORROSIÓN DE PROBETAS [mm/año]
20-051 CII-01	5,186	20,87	11,55
20-051 CII-02	4,858	21,38	10,56
20-051 CII-03	4,526	19,65	10,71
20-051 CII-04	4,817	22,89	9,78
20-051 CII-05	4,362	22,42	9,05

(Fuente: Propia)

Este cálculo puede replicarse para cada intervalo de exposición y se obtiene una tasa de corrosión por intervalo que se muestra en la tabla 3.27, estos datos son ilustrados en la figura 3.7 donde se representa la tasa de corrosión para cada probeta analizada.

Tabla 3.27. Tasa de corrosión por intervalo de 24 horas, durante el tiempo de ensayo (240 horas).

TASA DE CORROSIÓN DE PROBETAS [mm/año]	24 h	48 h	72 h	96 h	120 h	144 h	168 h	192 h	216 h	240 h
20-051 CII-01	72,02	46,66	33,99	26,77	21,91	18,48	16,10	14,25	12,75	11,55
20-051 CII-02	64,87	41,77	30,56	24,04	19,74	16,76	14,68	13,00	11,65	10,56
20-051 CII-03	69,36	43,76	32,01	25,01	20,45	17,25	15,00	13,24	11,85	10,71
20-051 CII-04	57,29	38,88	28,40	22,43	18,35	15,66	13,67	12,06	10,81	9,78
20-051 CII-05	53,76	35,54	26,18	20,69	16,96	14,51	12,61	11,12	9,97	9,05

(Fuente: Propia)

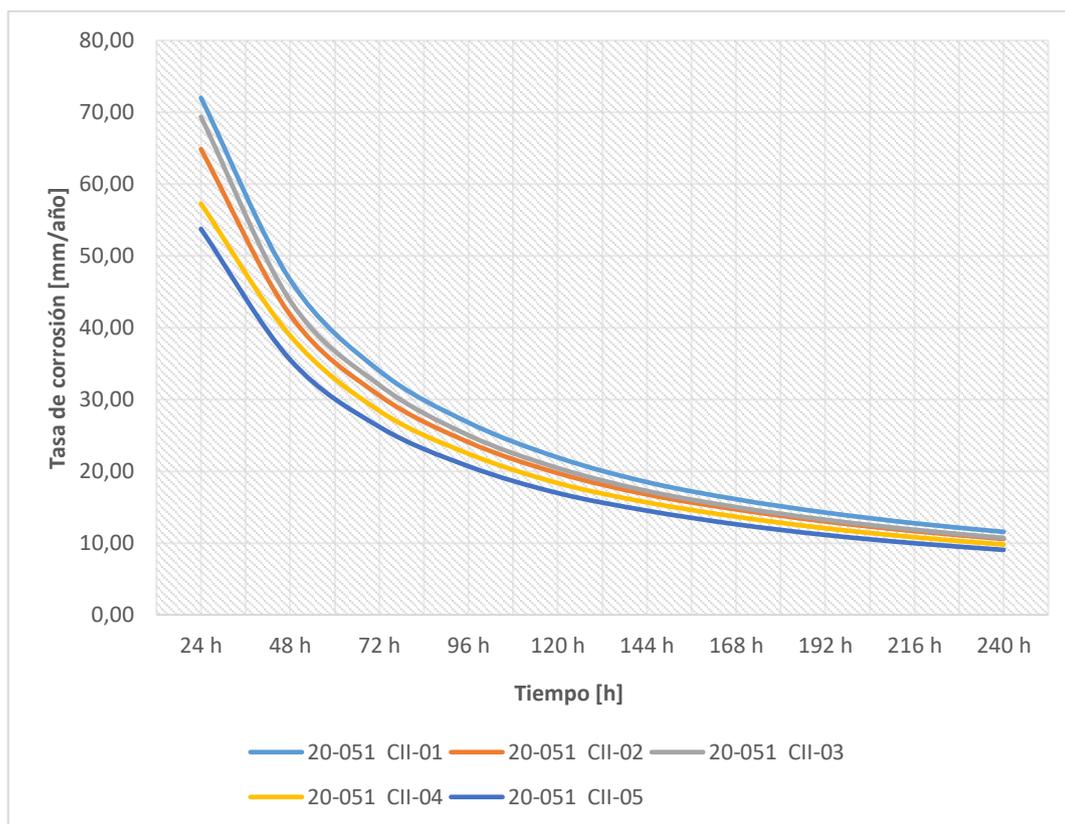


Figura 3.7. Tasa de corrosión en probetas con procedimiento de soldadura SMAW-SMAW.
(Fuente: Propia)

3.1.4.2. Resultado de ensayo de corrosión en probetas con procedimiento de soldadura GTAW-SMAW

Para determinar la pérdida de masa en las probetas se realizan mediciones cada 24 horas registrando la masa inicial y final en cada intervalo de exposición a la solución corrosiva, en la tabla 3.28 se muestran los datos de masa de las probetas con procedimiento de soldadura GTAW-SMAW hasta 120 h y en la tabla 3.29 los datos de 144 horas a 240 horas. Cada medida de masa registrada en las tablas corresponde al promedio de 3 mediciones.

Tabla 3.28. Datos de masa de probetas con procedimiento GTAW-SMAW hasta 120 h.

Identificación	INICIAL	24 [h]	48 [h]	72 [h]	96 [h]	120 [h]
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
20-051 CI-01	610,395	607,522	606,713	606,348	606,149	606,057
20-051 CI-02	606,356	603,351	602,596	602,263	602,082	602,013
20-051 CI-03	611,775	608,665	607,868	607,487	607,271	607,191
20-051 CI-04	600,959	597,454	596,571	596,200	595,996	595,901
20-051 CI-05	606,812	603,737	603,047	602,823	602,634	602,545
20-051 CI-06	575,245	575,242	575,241	575,235	575,236	575,241
Deriva de la balanza	-----	0,003	0,000	0,005	0,001	-0,005

(Fuente: Propia)

Tabla 3.29. Datos de masa de probetas con procedimiento GTAW-SMAW de 144 h hasta 240 h.

Identificación	INICIAL	144 [h]	168 [h]	192 [h]	216 [h]	240 [h]
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
20-051 CI-01	606,463	606,392	606,320	606,270	606,241	606,210
20-051 CI-02	602,454	602,401	602,315	602,264	602,232	602,199
20-051 CI-03	607,512	607,448	607,388	607,348	607,321	607,284
20-051 CI-04	596,151	596,084	596,012	595,968	595,931	595,885
20-051 CI-05	602,738	602,669	602,615	602,563	602,530	602,507
20-051 CI-06	575,243	575,241	575,242	575,243	575,243	575,247
Deriva de la balanza	-----	0,002	0,000	-0,001	0,000	-0,006

(Fuente: Propia)

Se calcula la pérdida de masa (W_D) con la ecuación 2.2 por cada intervalo de limpieza (24 horas) y se obtienen los datos mostrados en la tabla 3.30, estos datos permiten representar de manera gráfica la pérdida de masa para cada uno de los intervalos del ensayo en la figura 3.8. A continuación se muestra el cálculo de la pérdida de masa para la probeta 20-051 CI-01.

$$W_{Di} = W_{i-1} - W_i + Deriva_i$$

$$W_{D1} = W_{inicial} - W_{24h} + Deriva_{24h}$$

$$W_{D1} = 610.395 [g] - 607.522 [g] + 0.003 [g]$$

$$W_{D1} = 2.867 [g]$$

Donde:

W_{Di} : Pérdida de masa por intervalo de exposición [g]

W_{i-1} : Masa del intervalo antecesor del ensayo [g]

W_i : Masa por intervalo de exposición (24 h)[g]

$Deriva_i$: Error de la balanza al realizar 2 mediciones consecutivas por intervalo de exposición [g]

Tabla 3.30. Pérdida de masa por intervalos de exposición en probetas con procedimiento de soldadura GTAW-SMAW.

Identificación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
W_D	[g]									
20-051 CI-01	2,876	0,809	0,370	0,200	0,087	0,073	0,072	0,049	0,029	0,025
20-051 CI-02	3,008	0,755	0,338	0,182	0,065	0,055	0,086	0,050	0,032	0,028
20-051 CI-03	3,113	0,797	0,387	0,216	0,075	0,066	0,060	0,039	0,027	0,032
20-051 CI-04	3,508	0,883	0,376	0,205	0,090	0,069	0,072	0,042	0,037	0,040
20-051 CI-05	3,079	0,690	0,229	0,190	0,084	0,071	0,054	0,051	0,032	0,017

(Fuente: Propia)

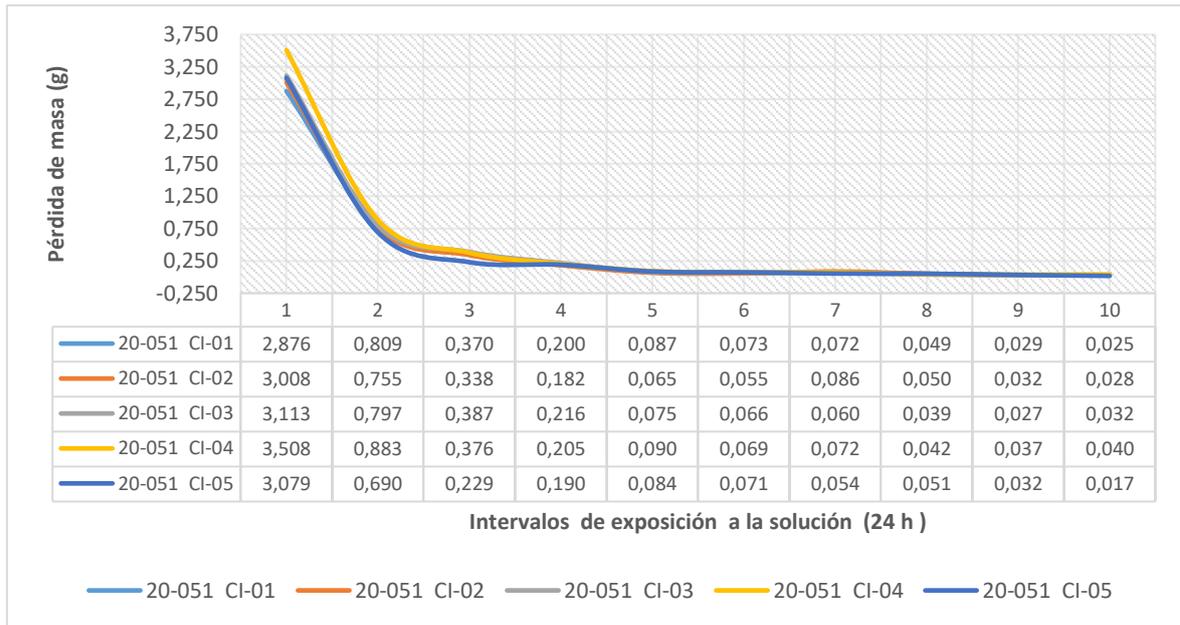


Figura 3.8. Pérdida de masa en probetas con procedimiento de soldadura GTAW-SMAW.

(Fuente: Propia)

Los datos experimentales de la diferencia de pérdida de masa (W_D) son analizados con el criterio de Chauvenet, empleando la ecuación 3.2. En la tabla 3.31 se muestran los datos cualitativos obtenidos al aplicar el criterio de Chauvenet para las probetas con procedimiento GTAW-SMAW.

$$\text{Criterio de Chauvenet} = \frac{W_{Dij} - M_j}{\sigma_j}$$

$$\frac{W_{Dij} - M_j}{\sigma_j} < K_C$$

Donde:

W_{Dij} = Diferencia de pérdida de masa [$i = 1, \dots, 5; j = 1, \dots, 10$]

M_j = Media aritmética de la diferencia de masa por intervalo [$j = 1, \dots, 10$]

σ_j = Desviación estandar por intervalo [$j = 1, \dots, 10$]

K_C = Coeficiente de Chauvenet para $n = 5$; $K_C = 1,65$

Se obtiene la pérdida de masa acumulada (W_A) para cada intervalo de 24 horas, durante el tiempo de ensayo (240 horas), los resultados son presentados en la tabla 3.32. La figura 3.9 presenta la pérdida de masa acumulada en función del tiempo para cada probeta del procedimiento de soldadura GTAW-SMAW.

Tabla 3.31. Datos cualitativos obtenidos al aplicar el criterio de Chauvenet para las probetas con procedimiento GTAW-SMAW.

Identificación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20-051 CI-01	SI									
20-051 CI-02	SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI
20-051 CI-03	SI									
20-051 CI-04	NO	SI								
20-051 CI-05	SI	SI	NO	SI						

*Se considera la evaluación cualitativa "SI" cuando el criterio de Chauvenet calculado es menor que Kc, de lo contrario la evaluación cualitativa es "NO"

(Fuente: Propia)

Tabla 3.32. Pérdida de masa acumulada para cada intervalo de 24 horas.

Identificación	0 h	24 h	48 h	72 h	96 h	120 h	144 h	168 h	192 h	216 h	240 h
	[g]										
20-051 CI-01	0,000	2,876	3,685	4,055	4,255	4,342	4,415	4,487	4,536	4,565	4,590
20-051 CI-02	0,000	3,008	3,763	4,102	4,283	4,348	4,403	4,488	4,538	4,570	4,598
20-051 CI-03	0,000	3,113	3,910	4,297	4,513	4,588	4,654	4,714	4,753	4,779	4,811
20-051 CI-04	0,000	3,508	4,391	4,767	4,972	5,062	5,131	5,203	5,245	5,282	5,323
20-051 CI-05	0,000	3,079	3,769	3,998	4,188	4,272	4,343	4,397	4,448	4,480	4,498

(Fuente: Propia)

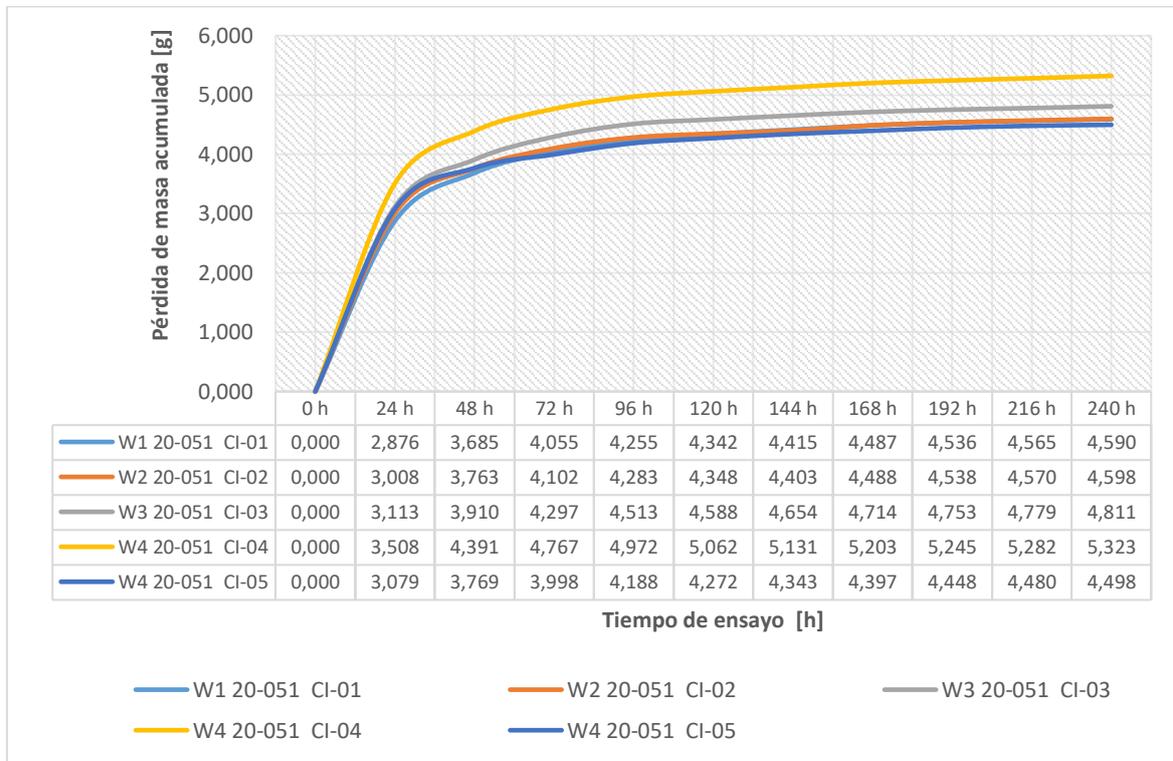


Figura 3.9. Pérdida de masa acumulada en probetas con procedimiento de soldadura GTAW-SMAW.

(Fuente: Propia)

El área de exposición (A_T) de la solución corrosiva está dado bajo el promedio de 3 mediciones diferentes el resultado se encuentra en la tabla 3.33.

Tabla 3.33. Área de exposición de la solución corrosiva.

IDENTIFICACIÓN	A_T [mm^2]	A_T [cm^2]
20-051 CI-01	2244,11	22,44
20-051 CI-02	2303,45	23,03
20-051 CI-03	2271,46	22,71
20-051 CI-04	2247,09	22,47
20-051 CI-05	2242,92	22,43
*El resultado es el promedio de 3 mediciones realizadas		

(Fuente: Propia)

La tasa de corrosión (CR) se calcula con la ecuación 1.1, los datos obtenidos de las probetas del procedimiento de soldadura SMAW-SMAW son presentados en la tabla 3.34, a continuación se presenta el cálculo de la tasa de corrosión (CR) calculada para la probeta con procedimiento SMAW-SMAW, identificación 20-051 CII-01.

$$CR = \frac{K \times W_A}{A_T \times T \times D}$$

$$CR = \frac{(8,76 \times 10^4 \left[\frac{\text{mm}}{\text{año}} \right]) \times (4,590 [\text{g}])}{(22,44 [\text{cm}^2]) \times (240 [\text{h}]) \times (7,85 \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right])}$$

$$CR = 9,51 \left[\frac{\text{mm}}{\text{año}} \right]$$

Donde:

$K = 8,76 \times 10^4 \left[\frac{\text{mm}}{\text{año}} \right]$; constante de conversión de unidades

$T = 240$ [h]; tiempo de exposición del ensayo.

$D = 7,85 \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]$; Densidad correspondiente del acero al carbono.

Tabla 3.34. Tasa de corrosión de las probetas del procedimiento de soldadura GTAW-SMAW.

IDENTIFICACIÓN DE PROBETAS GTAW-SMAW	W _A [g]	A _T [cm ²]	TASA DE CORROSIÓN DE PROBETAS [mm/año]
20-051 CI-01	4,590	22,44	9,51
20-051 CI-02	4,598	23,03	9,28
20-051 CI-03	4,811	22,71	9,85
20-051 CI-04	5,323	22,47	11,01
20-051 CI-05	4,498	22,43	9,32

(Fuente: Propia)

Este cálculo puede replicarse para cada intervalo de exposición y se obtiene una tasa de corrosión por intervalo que se muestra en la tabla 3.35, estos datos son ilustrados en la figura 3.10 donde se representa la tasa de corrosión para cada probeta analizada.

Tabla 3.35. Tasa de corrosión por intervalo de 24 horas, durante el tiempo de ensayo (240 horas).

TASA DE CORROSIÓN DE PROBETAS [mm/año]	24 h	48 h	72 h	96 h	120 h	144 h	168 h	192 h	216 h	240 h
20-051 CI-01	59,59	38,17	28,01	22,04	17,99	15,25	13,28	11,75	10,51	9,51
20-051 CI-02	60,73	37,98	27,60	21,62	17,55	14,81	12,94	11,45	10,25	9,28
20-051 CI-03	63,72	40,02	29,32	23,09	18,78	15,88	13,79	12,16	10,87	9,85
20-051 CI-04	72,59	45,43	32,88	25,72	20,95	17,70	15,38	13,57	12,14	11,01
20-051 CI-05	63,82	39,07	27,63	21,70	17,71	15,01	13,02	11,53	10,32	9,32

(Fuente: Propia)

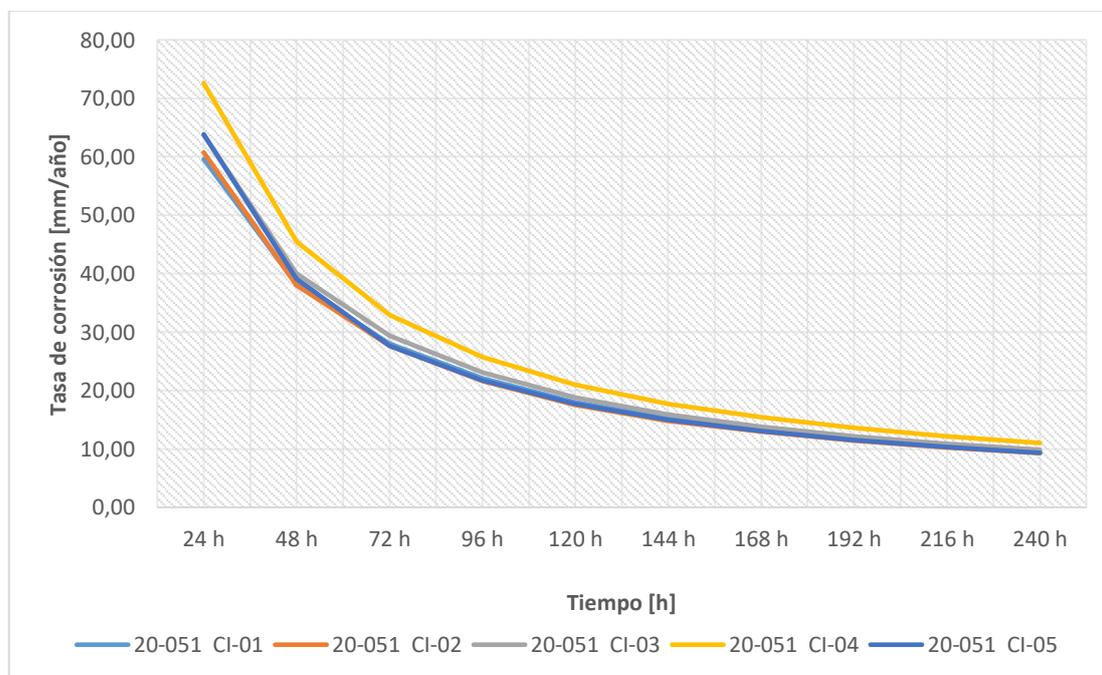


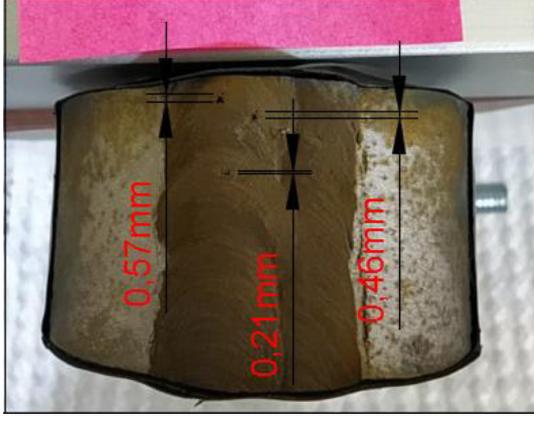
Figura 3.10. Tasa de corrosión en probetas con procedimiento de soldadura GTAW-SMAW.

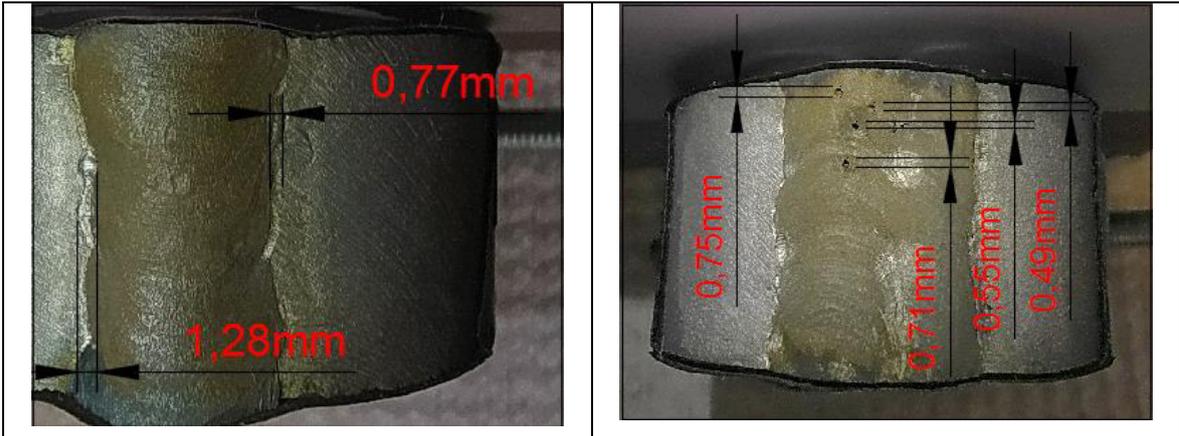
(Fuente: Propia)

3.1.4.3. Resultado de ensayo Macrográfico

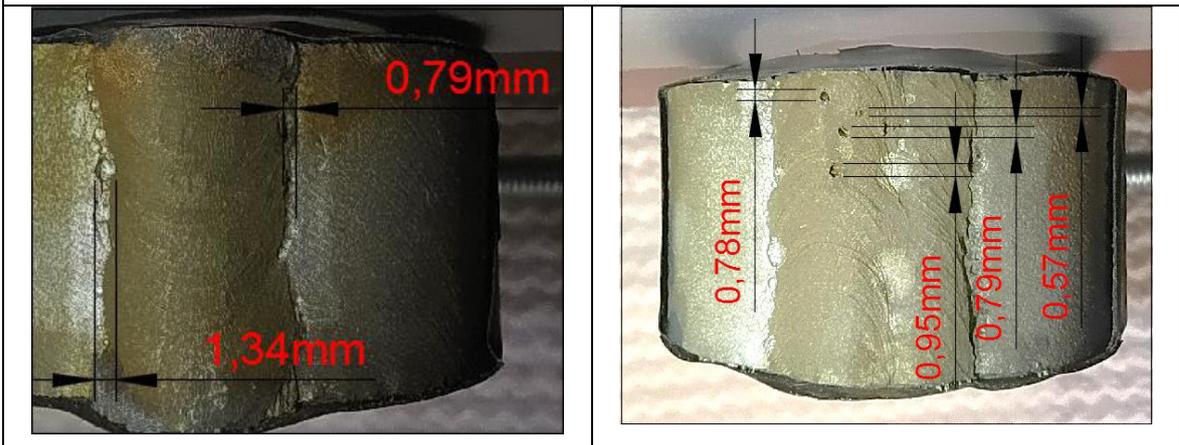
Se contrasta el registro fotográfico de las probetas 20-051 CII-01 y 20-051 CI-01 en la tabla 3.36, donde se evidencia la presencia de porosidades, fisuras o discontinuidades sobre las diferentes zonas de soldadura.

Tabla 3.36. Análisis macrográfico del ensayo de corrosión

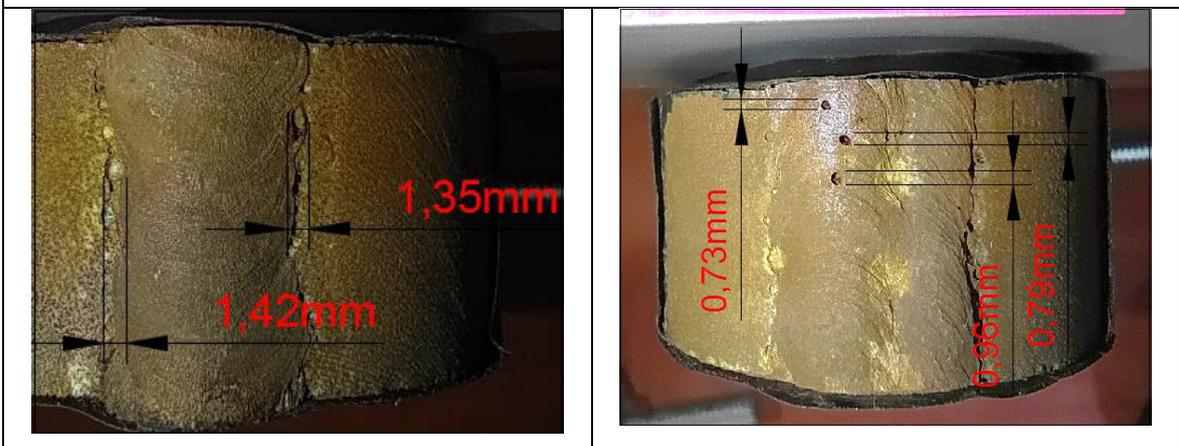
PROBETA 20-051 CII-01 PROCEDIMIENTO SMAW-SMAW	PROBETA 20-051 CI-01 PROCEDIMIENTO GTAW-SMAW
	
<p>Tiempo: 0 horas, las probetas previo a ser sumergidas en la solución corrosiva, no presentan fisuras o porosidades visibles</p>	
	
<p>Tiempo: 24 horas, al finalizar el primer intervalo de exposición la probeta 20-051 CI-01 presenta los primeros signos de corrosión, se observan 3 picaduras profundas, para ambas probetas sobre el cordón de soldadura se presenta corrosión uniforme.</p>	



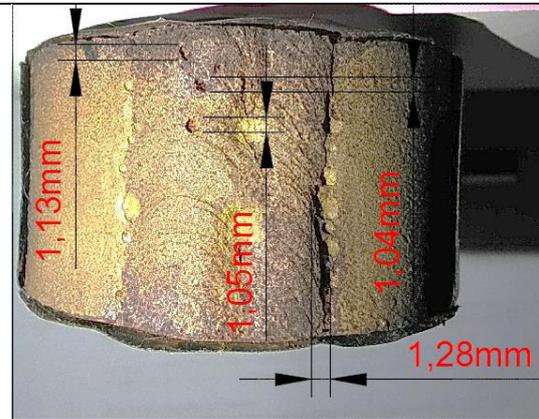
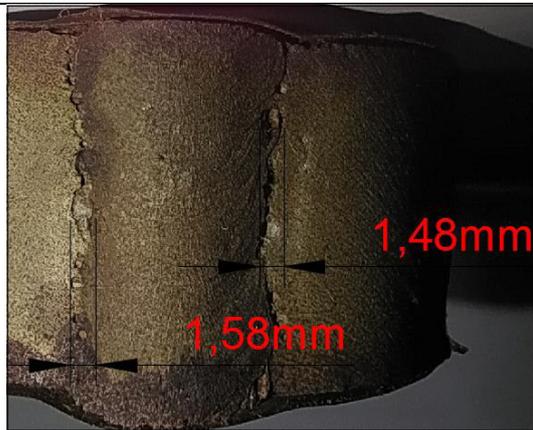
Tiempo: 48 horas, en la probeta 20-051 CII-01 se evidencia corrosión localizada sobre la interfaz de soldadura y corrosión uniforme sobre el cordón de soldadura, mientras que en la probeta 20-051 CI-01 se presentan picaduras que han aumentado su tamaño, corrosión localizada en la interfaz de soldadura y corrosión uniforme sobre el cordón de soldadura.



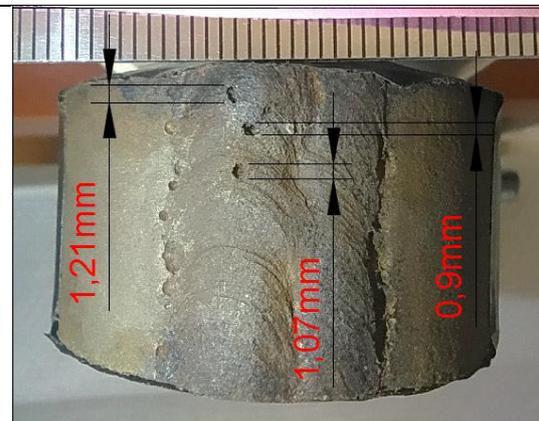
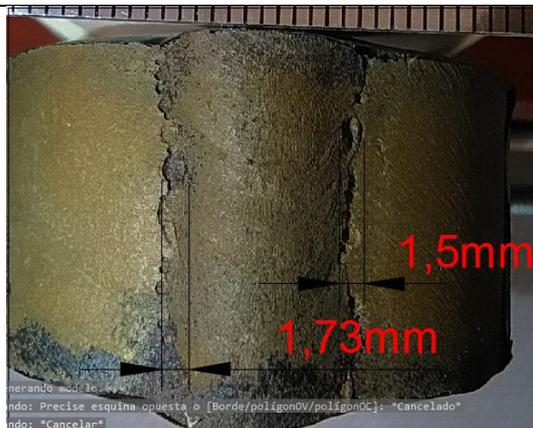
Tiempo: 72 horas, en la probeta 20-051 CII-01 la corrosión sobre la interfaz de soldadura es más evidente y ha aumentado su tamaño y en la probeta 20-051 CI-01 se presentan un mayor número de picaduras sobre el cordón de soldadura.



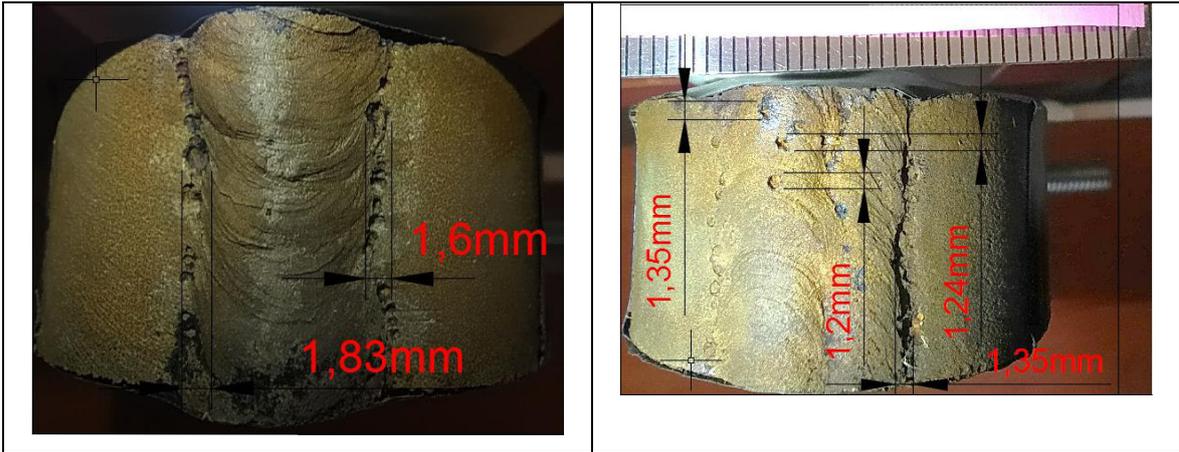
Tiempo: 96 horas, sobre las probetas se mantienen la presencia de corrosión uniforme sobre el cordón de soldadura, corrosión localizada en la interfaz de soldadura y en la probeta 20-051 CI-01 picaduras sobre el cordón de soldadura.



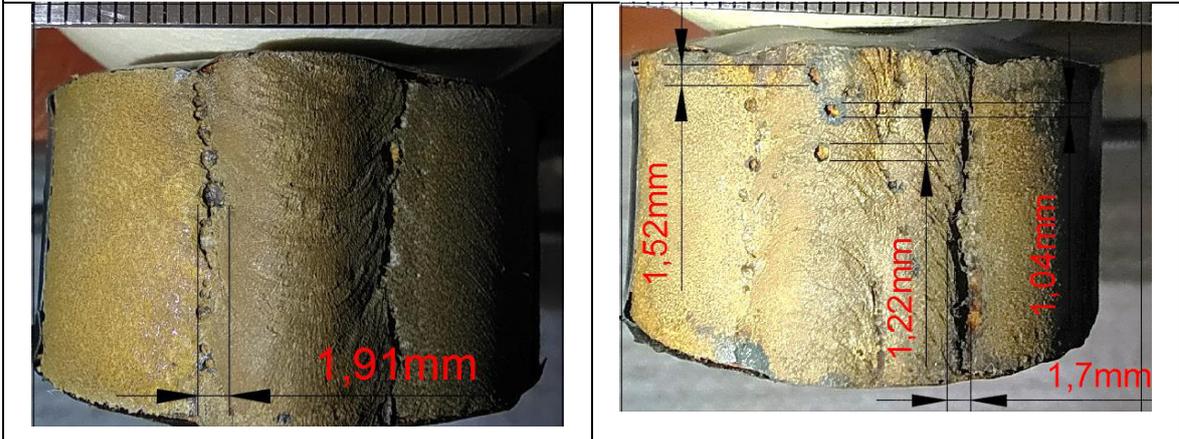
Tiempo: 120 horas, en la probeta 20-051 CII-01 se evidencia que la zona de la interfaz de soldadura ya ha perdido una significativa cantidad de masa, se observa fácilmente el desgaste en esta zona y en la probeta 20-051 CI-01, las picaduras tienden a ir aumentando de tamaño y la zona de interfaz de soldadura es más pronunciada.



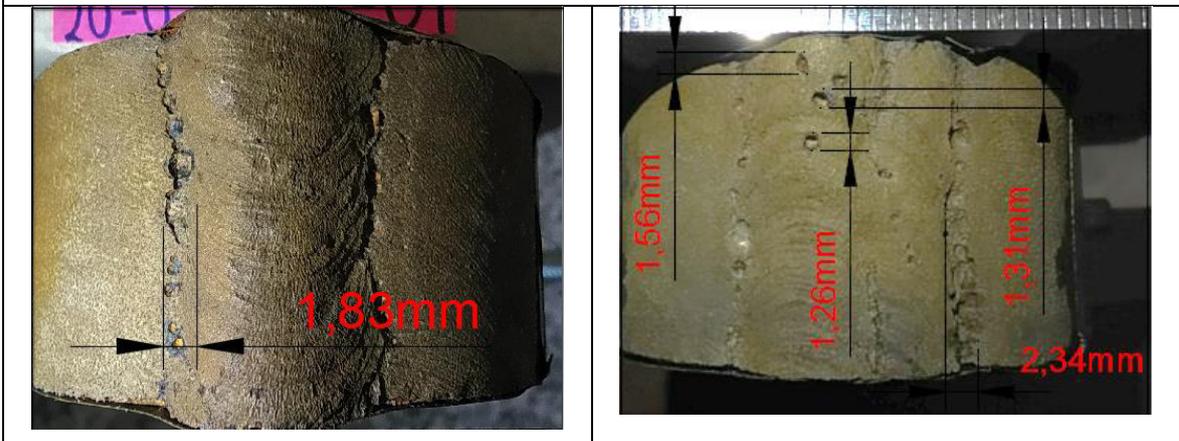
Tiempo: 144 horas, para ambas probetas la zona de interfaz de soldadura presenta mayor afectación, las picaduras son más grandes y evidentes en la probeta 20-051 CI-01.



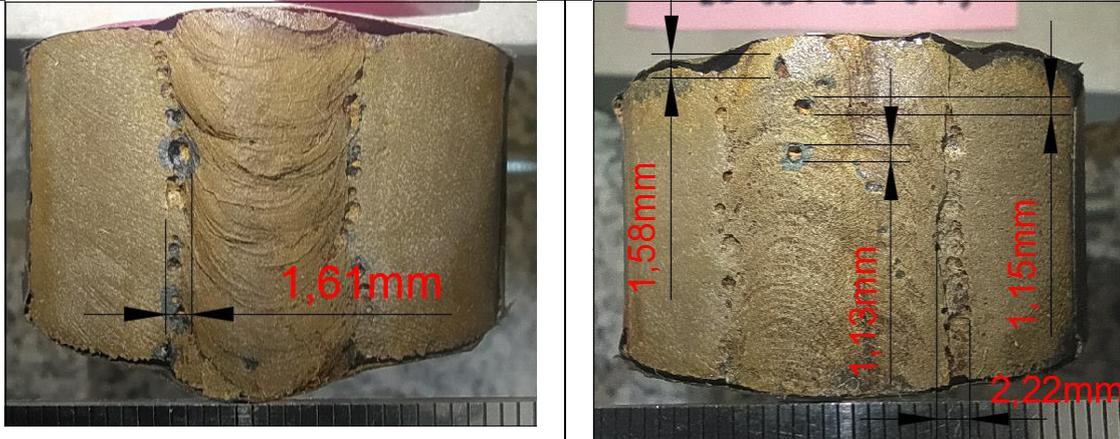
Tiempo: 168 horas, en la probeta 20-051 CII-01 se evidencia que la corrosión en la interfaz de soldadura ha aumentado de tamaño y en la probeta 20-051 CI-01 las picaduras y la corrosión en la interfaz de soldadura ha aumentado el tamaño.



Tiempo: 192 horas, la probeta 20-051 CII-01 presenta un desgaste más uniforme en comparación con la probeta 20-051 CI-01, además la zona más afectada es la interfaz de soldadura a comparación de la probeta con procedimiento GTAW-SMAW donde la presencia de picaduras fue el principal desgaste sobre el cordón de soldadura.



Tiempo: 216 horas, las probetas presentan corrosión uniforme sobre el cordón de soldadura y el metal base, la zona de interfaz de soldadura presenta mayor desgaste por corrosión y sobre la probeta de 20-051 CI-01 las picaduras han aumentado de tamaño.



Tiempo: 240 horas, la probeta 20-51 CII-01 presenta corrosión uniforme sobre el cordón de soldadura, corrosión localizada sobre la interfaz de soldadura que ha ido incrementando su tamaño, se observa sobre esta zona picaduras de tamaño considerable que provocan el desgaste significativo del material.

En la probeta 20-051 CI-01, sobre el cordón de soldadura existe la presencia de picaduras que han aumentado su tamaño en función del tiempo de exposición, estas picaduras también son evidentes en la interfaz de soldadura y sobre el cordón de soldadura y material base existe la presencia de corrosión uniforme.

(Fuente: Propia)

Durante el ensayo de macrográfico se evidencian tres tipos de corrosión sobre la zona expuesta a la solución corrosiva:

- Corrosión localizada sobre la interfaz de soldadura, esta zona está formado por la unión de dos elementos el material base y el material de aporte, es por ello que al existir el límite entre un material y otro, con diferente composición y estructura, la corrosión aprovecha las micro fisuras, porosidades o discontinuidades existentes en esta unión para presentarse y aumentar el desgaste.

- Corrosión uniforme, el estado energético del material base es similar en toda el área expuesta al igual que el cordón de soldadura, se presenta corrosión uniforme en estas áreas.
- Corrosión por picaduras, produce hoyos de tamaño pequeño sobre una zona.

En la siguiente tabla 3.37 se muestra la corrosión que se presentan sobre las probetas con procedimiento SMAW-SMAW y GTAW-SMAW.

Tabla 3.37. Corrosión presente en los procedimientos de soldadura.

Procedimiento	Corrosión uniforme en el metal base	Corrosión uniforme sobre el cordón de soldadura	Corrosión por picadura en interfaz de soldadura	Corrosión por picadura sobre el cordón de soldadura	Corrosión por picadura en metal base	Corrosión localizada en interfaz de soldadura
SMAW-SMAW	X	X	X	-	-	X
GTAW-SMAW	X	X	X	X	-	X

(Fuente: Propia)

3.1.4.4. Resultado de ensayo Micrográfico

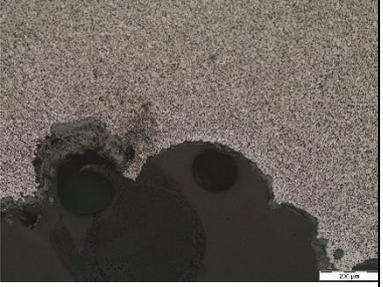
En el Anexo X se muestran las micrografías realizadas a las probetas de corrosión con aumentos de X100 y X500. Se tomaron micrografías de los filos en la cara y la raíz del cordón de soldadura de los procedimientos SMAW-SMAW y GTAW-SMAW.

El análisis micrográfico para el proceso SMAW-SMAW es realizado de las probetas 20-051-CII-02 que fue sometida a tensión y a un proceso de corrosión acelerado y la probeta 20-051-CII-06 que fue sometida a tensión. Las micrografías tienen un aumento X100 y fueron tomadas de la parte superior e inferior del material base, de la ZAC y del material de aporte.

Las probetas fueron dobladas y sometidas a una carga, por este motivo la raíz quedo a compresión y la sobremonta quedo a tensión, en las micrografías de las tablas 3.38 y 3.39 se aprecia que la corrosión es más agresiva en elementos que se encuentran a compresión que a tensión.

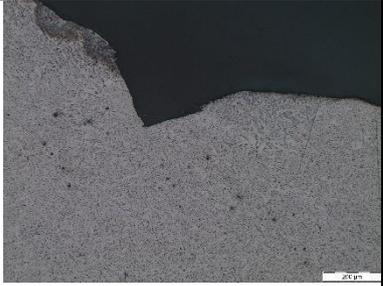
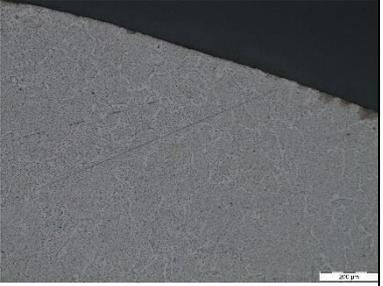
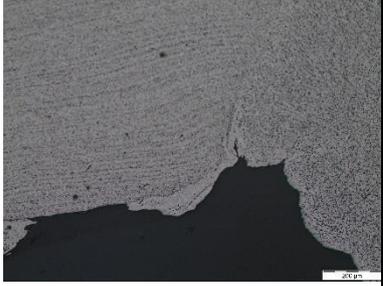
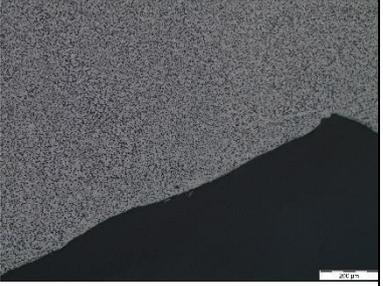
Al analizar la influencia del agente corrosivo se puede observar la presencia de corrosión generalizada y picaduras pronunciadas en la parte superior e inferior de la probeta que fue sumergida a este medio, además de observa una mayor pérdida de masa con respecto a la probeta no sumergida.

Tabla 3.38. Micrografías de la probeta 20-051 CII-02

Probeta 20-051-CII-02		
Material Base	ZAC	Material de Aporte
Superior X100 con ataque químico		
		
Inferior X100 con ataque químico		
		

(Fuente: Propia)

Tabla 3.39. Micrografías de la probeta 20-051 CII-06

Probeta 20-051-CII-06		
Material Base	ZAC	Material de Aporte
Superior X100 con ataque químico		
		
Inferior X100 con ataque químico		
		

(Fuente: Propia)

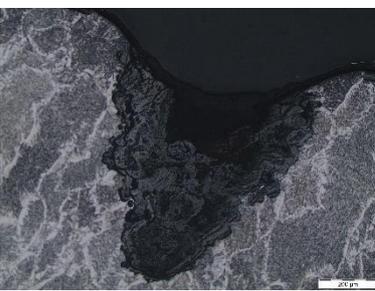
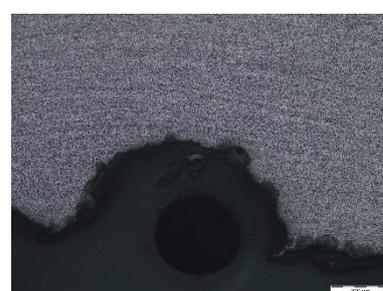
El análisis micrográfico para el proceso GTAW-SMAW es realizado de las probetas 20-051-CI-01 que fue sometida a tensión y a un proceso de corrosión acelerado y la probeta 20-051-CI-06 que fue sometida a tensión.

Las micrografías tienen un aumento X100 y fueron tomas de la parte superior e inferior del material base, del material de aporte y de la ZAC.

Las raíces de estas probetas están sometidas a compresión mientras que su sobremonta tiene cargas de tensión.

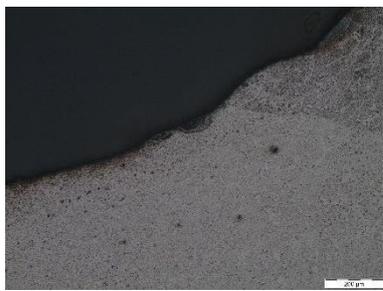
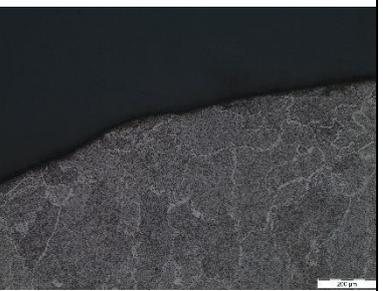
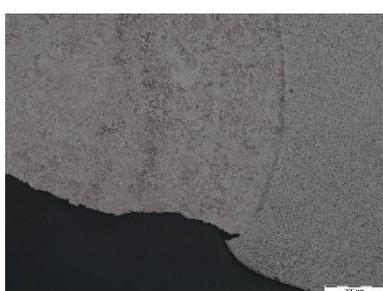
Al observar las micrografías de las tablas 3.40 y 3.41 se aprecia claramente la existencia de mayor cantidad de picaduras tanto en el material base, la ZAC y el pase de raíz a comparación de la sobre monta que solo presenta una enorme picadura.

Tabla 3.40. Micrografías de la probeta 20-051 CI-01

Probeta 20-051-CI-01		
Material Base	ZAC	Material de Aporte
Superior X100 con ataque químico		
		
Inferior X100 con ataque químico		
		

(Fuente: Propia)

Tabla 3.41. Micrografías de la probeta 20-051 CI-06

Probeta 20-051 CI-06		
Material Base	ZAC	Material de Aporte
Superior X100 con ataque químico		
		
Inferior X100 con ataque químico		
		

(Fuente: Propia)

3.2. Discusión

3.2.1. Caracterización del material base

La tubería empleada para el estudio de corrosión corresponde a la tubería API 5L X56 de grado PSL 2, que cumple con los requisitos especificados en la norma API 5L (2004), límite de fluencia mostrado en la figura 3.1, resistencia última a la tracción mostrado en la figura 3.2 y de composición química mencionada en la tabla 3.5.

3.2.1.1. Ensayo metalográfico

Los ensayos metalográficos realizados a las probetas 20-051-MB-01T y 20-051-MB-02L correspondientes a la sección transversal y longitudinal del material base, permitieron verificar que la microestructura corresponde a una tubería API 5L X56 PSL2 laminada, debido a la similitud y correcta presencia en cantidad de las fases perlita y ferrita en comparación al trabajo “Estudo do comportamento mecânico do aço API 5L X56 utilizado na fabricação de tubulações”(Ferreira, 2014). La microestructura de este acero consiste en

pequeñas colonias de perlita en una matriz de ferrita. La tubería al ser un acero con una matriz compuesta por ferrita y perlita, donde predomina la ferrita, tiene mejor ductilidad y soldabilidad, la cantidad de perlita presente entrega la dureza necesaria para ser un acero sometido tanto a cargas de tensión como de compresión sin que se fragilice el metal. (Callister, 2003).

3.2.2. Soldadura

Los procedimientos de soldadura deben cumplir los requerimientos de ensayos solicitados para su aceptación, en los siguientes apartados se muestran las comparaciones de los resultados con los requerimientos en base a la norma API 1104.

3.2.2.1. Ensayo de tracción

En las tablas 3.42 y 3.43 se comparan los resultados de resistencia mínima a la tracción con la norma API 1104, las probetas ensayadas cumplen con los requerimientos necesarios para la aceptación de las soldaduras.

Tabla 3.42. Análisis de aceptación de ensayo de tracción para el procedimiento de soldadura SMAW-SMAW.

Identificación	Resistencia a la tracción obtenida [MPa]	Resistencia a la tracción mínima [MPa]	Observaciones	Conclusión
20-051-IIA-11 TT	535,2 [MPa]	490,0 [MPa]	FJS	CUMPLE
20-051-IIB-11 TT	537,5 [MPa]	490,0 [MPa]	FMB	CUMPLE
20-051-IIC-11 TT	538,1 [MPa]	490,0 [MPa]	FMB	CUMPLE
20-051-IID-11 TT	540,2 [MPa]	490,0 [MPa]	FMB	CUMPLE
*FMB = Falla en el material base *FJS = Falla en la junta soldada				

(Fuente: Propia)

Tabla 3.43. Análisis de aceptación de ensayo de tracción para el procedimiento de soldadura GTAW-SMAW.

Identificación	Resistencia a la tracción obtenida [MPa]	Resistencia a la tracción mínima [MPa]	Observaciones	Conclusión
20-051-IA-11 TT	552,4 [MPa]	490,0 [MPa]	FMB	CUMPLE
20-051-IB-11 TT	529,5 [MPa]	490,0 [MPa]	FMB	CUMPLE
20-051-IC-11 TT	547,9 [MPa]	490,0 [MPa]	FMB	CUMPLE
20-051-ID-11 TT	526,2 [MPa]	490,0 [MPa]	FMB	CUMPLE
*FMB = Falla en el material base *FJS = Falla en la junta soldada				

(Fuente: Propia)

Se comparan los resultados obtenidos de resistencia mínima a la tracción mostrados en las tablas 3.8 y 3.15, se evidencia que en el procedimiento de soldadura GTAW-SMAW, la resistencia a la tracción es mayor, donde se utilizó material de aporte para el pase de raíz que tiene contenido de carbono más alto en su composición.

3.2.2.2. Ensayo de Nick-Break

Los resultados de los ensayos Nick-Break se encuentran detallados en la tabla 3.9 y 3.16, de las 8 probetas se tienen tres observaciones, la primera es una porosidad de 0.48 mm de diámetro en la probeta 20-051-IIA-III-NB correspondiente al procedimiento de soldadura SMAW-SMAW, la segunda observación también es un poro de 0.947 mm de diámetro en la probeta 20-051-IA-III-NB que es del procedimiento de soldadura GTAW-SMAW y finalmente la última observación de los ensayos Nick-Break es un poro de 0.969 mm en la probeta 20-051-IB-III-NB que es del procedimiento de soldadura GTAW-SMAW.

La presencia de porosidades es evidencia de gases atrapados durante los procedimientos de soldadura, al existir una gran cantidad de poros disminuye la densidad del metal y por lo tanto su resistencia es menor, por ello para la aceptación de un procedimiento de soldadura se establece el tamaño y número de poros que pueden estar presentes en una muestra.

En la sección 5.6.3.3 de la norma API 1104 especifica que son aceptables las inclusiones de escoria menores a 3 mm de longitud y 0.8 mm de profundidad, las porosidades son aceptables si son a 1.6 mm; por lo tanto las probetas ensayadas cumplen con los requerimientos para la aceptación de cada procedimiento de soldadura.

3.2.2.3. Ensayo de doblado de cara y raíz

Los resultados de los ensayos de doblado de cara y raíz se encuentran detallados en la tabla 3.10 y 3.17, de las 16 probetas se tiene 1 observación, dos discontinuidad de 1.05 mm y 1.226 mm de longitud correspondiente a la probeta 20-051-IID-IV-DR de procedimiento de soldadura GTAW-SMAW.

Durante el doblado las probetas son sometidas a cargas de tensión que en combinación con un concentrador de tensiones podrían producir fisuras en la superficie, estas discontinuidades son indeseadas ya que tiene tendencia a la propagación y producir la ruptura de la muestra, estas fisuras o grietas en tanto no sobrepasen el límite establecido en la norma API 1104 no representan un riesgo para su funcionamiento.

Las discontinuidades encontradas se compararon con los criterios de aceptación de la sección 5.6.4.3 de norma API 1104, que establece que son permisibles las grietas u otras

imperfecciones que no sobrepasen los 3 mm (1/8 de pulgada) o la mitad de la longitud del espesor de la pared.

Todas las probetas cumplen con el criterio de aceptación, por lo cual los dos procedimientos de soldadura aprueban el ensayo de cara y raíz realizado.

3.2.2.4. Aprobación de los procedimientos de soldadura

Los procedimientos de soldadura SMAW-SMAW y GTAW-SMAW cumplen con los criterios de aceptación de ensayo de tracción, ensayo Nick-Break y ensayo de doblado de cara y raíz establecidos en la norma API 1104. Estos ensayos mecánicos aprueban la aptitud de los procedimientos realizados.

3.2.2.5. Ensayo micrográfico

Los ensayos micrográficos de los procedimientos de soldadura se realizaron en la probeta 20-051-SMAW-01 que corresponde al proceso SMAW-SMAW y en la probeta 20-051-GTAW-02 que corresponde al proceso GTAW-SMAW.

En el proceso de soldadura se llegó a una temperatura de 246°C, esta temperatura es considerablemente menor a los 727 °C necesarios para un cambio de fase (Lippold J,2015), por este motivo se observa en la ZAC una microestructura similar a la del material base. Se busca que los materiales sean compatibles y con similar microestructura para que exista una adecuada coalescencia en la unión del metal base con el material de aporte, para evitar discontinuidades, formación y propagación de fisuras que facilitan la corrosión.

El primer pase fue realizado con un electrodo E7010 y como se puede apreciar en las micrografías de la tabla 3.12 su microestructura es similar al material base y a la ZAC debido a la temperatura máxima fue de 705°C y no supera la temperatura de austenización, por lo cual presenta una microestructura ferrítico-perlítica (Azeddine, 2012).

En el segundo pase se mantiene una microestructura ferrítico-perlítica mayor presencia de perlita y una disminución en el tamaño del grano de la ferrita, al aumentar la perlita también aumenta la dureza del material.

El tercer pase fue realizado con electrodo E7018 y presenta una microestructura de perlita, ferrita Widmanstätten, ferrita acicular y ferrita alitromórfica, además se observa un aumento de perlita en comparación a los pases anteriores.

En las micrografías del proceso de soldadura GTAW mostradas en la tabla 3.19, se utiliza el material de aporte ER80S y se llega a una temperatura de 1200°C, esta temperatura es considerablemente mayor a los 727°C necesarios para un cambio de fase (Lippold J,2015),

por este motivo se observa en el primer pase una microestructura que resultó esencialmente en una fracción de martensita con solo una fracción muy pequeña de austenita debido a la presencia de una cantidad considerable de Mo, además se nota la presencia de ferrita acicular con una microestructura mucho más fina y pequeñas cantidades perlita. Esta diferencia en la microestructura se reflejó en una mayor dureza.

En el segundo pase mantiene la microestructura con un crecimiento de la cantidad de ferrita y perlita, el tercer pase fue realizado con electrodo E7018 y presenta una microestructura ferrítica perlítica con mayor presencia de ferrita.

El cuarto pase fue realizado con electrodo E7018 y presenta una microestructura de ferrita Widmanstätten, ferrita acicular y ferrita alitromórfica, además se observa un aumento de perlita en comparación al pase anterior.

3.2.2.6. Ensayo macrográfico

En el ensayo macrográfico de las probetas empleadas se evidencia una mordedura sobre el último pase del procedimiento GTAW-SMAW, esta no representa un riesgo para la integridad mecánica de la tubería ya que no se encuentra entre los pases, se observa una buena fusión metalúrgica en ambos procedimientos de soldadura, aunque se tiene en consideración que para obtener estos resultados se realizó un precalentamiento en el material base, el calor generado durante el proceso de soldadura influye en el cambio de la microestructura de la ZAC, aumentando el tamaño de grano presente y resultando el aumento en la dureza del metal como se puede evidenciar en las tablas 3.11 y 3.18 que muestran los resultados de las durezas después de los procedimientos de soldadura.

Existe una disimilitud más notable cuando se realiza el procedimiento de soldadura GTAW-SMAW, en el pase de raíz, el material de aporte tiene un mayor contenido de carbono que el electrodo E7010 al comparar la tabla 3.13 y 3.20, ocasionando que sea un sector con mayor dureza que el resto del cordón, la coalescencia en este sector debido a esta disimilitud es menor que el pase de raíz con procedimiento SMAW, lo que facilita la formación de picaduras en esta área.

3.2.3. Corrosión

3.2.3.1. Ensayo micrográfico

Se conoce que la perlita está formada por cementita y ferrita, en esta combinación la cementita forma un cátodo, la ferrita un ánodo y estas a su vez forman una celda galvánica, que es por donde se desplaza la corrosión. Por lo tanto, al disponer de mayor cantidad de perlita en la ZAC y en el pase de raíz la corrosión es más agresiva en estos lugares.

En la probeta 20-051-CI-01 de la tabla 3.40 se aprecia corrosión generalizada y picaduras tanto en el material de aporte como en la ZAC, esta fue generada por el agente corrosivo que se desplazó por los bordes de grano. Al comparar la probeta anterior con la probeta 20-051-CI-06 de la tabla 3.41 que no fue expuesta a la solución corrosiva, esta última no presenta picaduras y su superficie se mantiene integra, la corrosión avanza superficialmente hasta encontrar discontinuidades producto de las cargas aplicadas a las probetas, fisuras, concentradores de esfuerzos y se desplaza entre ellas disminuyendo la densidad del material.

3.2.3.2. Ensayo macrográfico

En la tabla 3.36 se evidencian tres tipos de corrosión sobre la zona expuesta a la solución corrosiva.

Sobre el área expuesta a solución corrosiva se produce corrosión generalizada que es la responsable de la mayor pérdida de masa, en la interfaz entre el cordón de soldadura y la ZAC existe una corrosión localizada que es más notoria en probetas con procedimiento de soldadura GTAW-SMAW debido a la disimilitud de los componentes del material de aporte y el material base, la carga de tensión aplicada a las probetas favorece la formación de microfisuras por las que se desplaza la corrosión y provoca la creación de picaduras.

Sobre el cordón de soldadura al transcurrir el tiempo de exposición se evidencio la presencia de defectos superficiales que incrementaron su profundidad una vez que la capa exterior se deterioró, produciendo la formación de picaduras que se desplazaron hacia el interior del metal.

En la siguiente tabla 3.44 se muestra la corrosión que se presentan sobre las probetas con procedimiento SMAW-SMAW y GTAW-SMAW.

Tabla 3.44. Corrosión presente en los procedimientos de soldadura.

Procedimiento	Corrosión uniforme en el metal base	Corrosión uniforme sobre el cordón de soldadura	Corrosión por picadura en interfaz de soldadura	Corrosión por picadura sobre el cordón de soldadura	Corrosión por picadura en metal base	Corrosión localizada en interfaz de soldadura
SMAW-SMAW	X	X	X	-	-	X
GTAW-SMAW	X	X	X	X	-	X

(Fuente: Propia)

3.2.3.3. Tasa de corrosión

En la figura 3.11 se muestra los datos de corrosión obtenidos de cada una de las probetas analizadas de los procedimientos de soldadura.

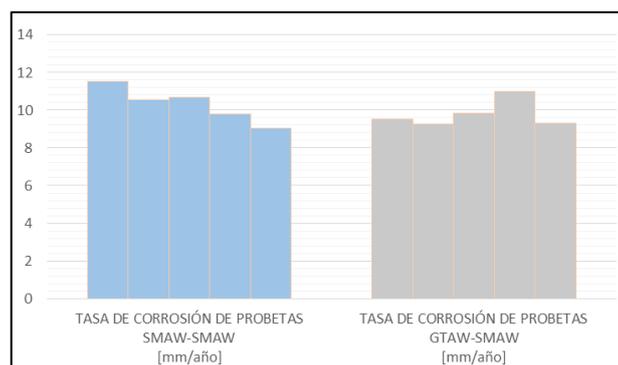


Figura 3.11. Tasa acumulada de corrosión para los procedimientos de soldadura SMAW-SMAW y GTAW-SMAW
(Fuente: Propia)

Se observa que la tasa de corrosión en probetas con procedimiento GTAW-SMAW es ligeramente menor que en las probetas con procedimiento SMAW-SMAW, para analizar si esta diferencia es significativa se emplea la herramienta estadística T de Student, que compara las medias aritméticas de dos grupos de muestras, en la tabla 3.44 se muestra el resultado del análisis, este análisis nos indica que si $P < 0.05$ la diferencia es significativa, en este caso se concluye que al comparar la tasa de corrosión obtenida para los procedimientos SMAW-SMAW y GTAW-SMAW la diferencia de las medias no es significativa.

Tabla 3.45. Análisis del factor P de la T- Student para la comparación de la tasa de corrosión de las probetas ensayadas.

	Procedimiento SMAW-SMAW	Procedimiento GTAW-SMAW
Media	10,3304	9,7955
Varianza	0,9084	0,5137
Observaciones	5,0000	5,0000
Grados de libertad	4,0000	
Estadístico t	0,9241	
P(T<=t) dos colas	0,4077	
Valor crítico de t (dos colas)	2,7764	

(Fuente: Propia)

Se observa en las figuras 3.7 y 3.10 que la tasa de corrosión en los procedimientos de soldadura disminuye hasta llegar a estabilizarse, este comportamiento se debe a que los metales buscan estabilizarse termodinámicamente cuando se encuentran en un estado de mayor energía debido al procesamiento del material.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- El proyecto cumple con los objetivos planteados.
- La tubería API 5L X56 de grado PSL 2, cumple con los requerimientos mecánicos, químicos y metalográficos para material, establecidos en la norma API 5L.
- En el procedimiento de soldadura con pase de raíz en procedimiento SMAW y pases de relleno en procedimiento SMAW, se observaron discontinuidades que al analizarlos no superaban los límites requeridos para la aceptación de la soldadura bajo la norma API 1104, por lo tanto se admite el procedimiento de soldadura SMAW-SMAW.
- En el procedimiento de soldadura con pase de raíz en procedimiento GTAW y pases de relleno en procedimiento SMAW, se observaron discontinuidades que al analizarlos no superaban los límites requeridos para la aceptación de la soldadura bajo la norma API 1104, por lo tanto se admite el procedimiento de soldadura GTAW-SMAW.
- La tasa de corrosión calculada se encuentra en el intervalo de 9.05 [mm/año] a 11.55 [mm/año] para la combinación de procedimientos de soldadura SMAW-SMAW, basados en la tabla de aceptación de tasa de corrosión de Campbell, el resultado obtenido es satisfactorio y puede emplearse en partes no críticas donde se tiene una mayor tolerancia de la tasa de corrosión.
- La tasa de corrosión calculada se encuentra en el intervalo de 9.28 [mm/año] a 11.01 [mm/año] para la combinación de procedimientos de soldadura GTAW-SMAW, basados en la tabla de aceptación de tasa de corrosión de Campbell, el resultado obtenido es satisfactorio y puede emplearse en partes no críticas donde se tiene una mayor tolerancia de la tasa de corrosión.
- La zona afectada por el calor y la interfaz de soldadura son áreas con mayor desarrollo de discontinuidades que provocan la formación de picaduras debido a los esfuerzos de tensión a los que se someten las probetas y a la disimilitud entre los materiales de aporte y el material base.
- La perlita está formada por cementita y ferrita, en esta combinación la cementita forma un cátodo, la ferrita un ánodo y estas a su vez forman una celda galvánica, que es por donde se desplaza la corrosión. Por lo tanto, al disponer de mayor cantidad de perlita en la ZAC y en el pase de raíz, la corrosión es más agresiva en estos lugares.

- Al analizar la influencia del agente corrosivo se puede observar la presencia de corrosión generalizada y picaduras pronunciadas en la parte superior e inferior de la probeta, sin embargo al analizar todas las macrográficas se tiene que existe una mayor afectación en la raíz que se encuentra en compresión.
- La tasa de corrosión en los procedimientos de soldadura disminuye hasta llegar a estabilizarse, este comportamiento se debe a que los metales buscan equilibrio termodinámico cuando se encuentran en un estado de mayor energía.

4.2. Recomendaciones

- Después de 120 horas de exposición, la pérdida de masa es relativamente estable por lo que no es necesario tener más intervalos de exposición a la solución corrosiva después de este tiempo.
- Durante el ensayo de corrosión las primeras horas son críticas para tener una mejor muestra analizar en intervalos más cortos durante las primeras 48 horas de exposición.
- Emplear herramientas estadísticas para descartar valores atípicos durante el muestreo de datos.
- Realizar las comparaciones de las muestras bajo criterios estadísticos, como ANOVA o T-Student, de acuerdo a las variables a analizar.

Referencias Bibliográficas

- American Petroleum Institute. (2004). Specification for Line Pipe. Washington D. C.: API Publishing Services.
- ASTM International. (2012). NACE / ASTM G31-12^a. Guía estándar para pruebas de corrosión por inmersión en laboratorio de metales.
- Baboian, R. (2005). Corrosion tests and standards. 2nd ed. West Conshohocken, Pa: ASTM International.
- Callister, Jr. (2003). Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales. W.D. 620 CAL Editorial Reverté, S.A.
- Ferreira L. (2014) Estudo do comportamento mecânico do aço API 5L X56 utilizado na fabricação de tubulações.
- Javaherdashti, R. (2008). Microbiologically Influenced Corrosion. Springer Science & Business Media, ISBN 184800074.
- Jeffus, L. (2009). Soldadura: Principios y Aplicaciones. Ediciones Paraninfo, S.A. ISBN-10.
- O'Brien, R. L. (1996). AWS Manual de Soldadura. Editorial Reverté, S.A., 8a edición.
- Muñoz Fernández, H., González Mendoza, L. Peña Ballasteros, D. (2019). Evaluación de la velocidad de corrosión- erosión en un acero API 5L grado 65 en un sistema salmuera-CO₂-SiO₂-aceite mineral, por medio de técnicas electroquímicas. Doctorado. Universidad Industrial de Santander.
- El SOTE, 46 años transportando el crudo amazónico – EP PETROECUADOR. [online] Eppetroecuador.ec. Disponible en: <https://www.eppetroecuador.ec/?p=6845> [Acceso: 2 oct. 2019].
- R. Baboian, (2005) Corrosion tests and standards, 2nd ed. West Conshohocken, Pa: ASTM International
- ASTM International. (2015) G58-85 (2015) Práctica estándar para la preparación de muestras de prueba de tensión y corrosión para soldaduras.
- Moon, I., Jang, B., Kim, S., & Koh, J. (2019). A Study on Characteristics of Dissimilar Welds between Super Duplex Stainless Steel UNS S32750 and Carbon Steel A516-70 with FCAW. Retrieved 21 October 2019, from <http://www.e-jwj.org/journal/view.php?number=2031606>

STRAUSS, M. B., & BLOOM, M. C. (1960). Cracking of Low Carbon Steel by Ferric Chloride Solutions. CORROSION, 16(11), 553t–556t. doi:10.5006/0010-9312-16.11.109 Disponible en: <https://corrosionjournal.org/doi/abs/10.5006/0010-9312-16.11.109>

Lincon, E. (2019). E 8018-C1. Retrieved 21 October 2019, from [https://www.lincolnelectric.com/es-co/Consumables/Pages/product.aspx?product=Products_Consumable_StickElectrodes-MildandLowAlloySteels-BajoHidrogeno-E8018C1\(LincolnElectric\)](https://www.lincolnelectric.com/es-co/Consumables/Pages/product.aspx?product=Products_Consumable_StickElectrodes-MildandLowAlloySteels-BajoHidrogeno-E8018C1(LincolnElectric))

Lincon, E. (2019). Gricon® 7010-P1. Retrieved 21 October 2019, from [https://www.lincolnelectric.com/es-mx/Consumables/Pages/product.aspx?product=Products_Consumable_StickElectrodes-MildandLowAlloySteels-Gricon-Gricon7010P1\(LincolnElectric\)](https://www.lincolnelectric.com/es-mx/Consumables/Pages/product.aspx?product=Products_Consumable_StickElectrodes-MildandLowAlloySteels-Gricon-Gricon7010P1(LincolnElectric))

Lincon, E. (2019). Lincoln® ER80S-Ni1. Retrieved 21 October 2019, from [https://www.lincolnelectric.com/en-us/Consumables/Pages/product.aspx?product=Products_Consumable_CutLengthConsumables-Lincoln-LincolnER80S-Ni1\(LincolnElectric\)](https://www.lincolnelectric.com/en-us/Consumables/Pages/product.aspx?product=Products_Consumable_CutLengthConsumables-Lincoln-LincolnER80S-Ni1(LincolnElectric))

ASTM International. (2012) NACE / ASTM G31-12a Guía estándar para pruebas de corrosión por inmersión en laboratorio de metales.

ASTM International. (2016) G30-97 (2016) Práctica estándar para hacer y usar muestras de prueba de corrosión y esfuerzo de flexión en U.

ASTM International. (2016) G39-99 (2016) Práctica estándar para la preparación y el uso de muestras de prueba de corrosión y tensión de haz doblado.

ASTM International. (2018) G46-94 (2018) Guía estándar para el examen y la evaluación de la corrosión por picadura.

ASTM G49-85. (2011). Standard Practice for Preparation and Use of Direct Tension Stress-Corrosion Test Specimens.

AWS B4.0. (2007). MÉTODOS ESTÁNDARES PARA PRUEBAS MECÁNICAS DE SOLDADURA.

ASTM G49-85. (2011). Standard Practice for Preparation and Use of Direct Tension Stress-Corrosion Test Specimens.

American Petroleum Institute. (2004). Specification for Line Pipe. Washington D. C.: API Publishing Services.

ANEXOS

Anexo I.

ESPECIFICACIONES DEL ELECTRODO E7010

Los anexos I al III se presentan las características químicas, mecánicas y recomendaciones de uso para el electrodo E7010, E7018 y alambre ER80S, según su respectivo fabricante OERLIKON, AGA Y OXFORD ALLOY.

FLEXAL 70



MMA Electrodes C-Mn and low-alloy steels

Cellulosic coated electrode for welding girth seams of pipe lines, using the vertical-down technique. It is suitable for welding root passes, fill and cover passes.

Classification	
AWS	A5.5: E 7010-G
EN	499: E 42 2 C 21
EN ISO	2560-A: E 42 2 C 21

Approvals	Grades
ABS	
DNV	
LRS	
TÜV	

see Appendix, Classification Society Approvals, for details pag. 521

Analysis of all-weld metal (Typical values in %)

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Nb	V	N	Cu
0.10	0.70	0.20	-	-	-	-	-	-	-	-	-

All-weld metal Mechanical Properties

Heat Treatment	Yield Strength N/mm ²	Tensile Strength N/mm ²	Elongation A5 (%)	Impact Energy ISO - V (J) - 20 °C	Hardness
As Welded	≥ 420	500-640	≥ 24	≥ 47	-

Materials

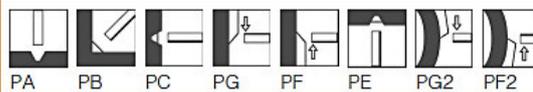
L210-L415, X42-X60

Storage and redrying

Do not re-dry

Current condition and welding position

DC+; DC-; AC



Packaging data

Diameter (mm)	Length (mm)	Current (A)	Electrode average weight (g)	Weld metal weight per electrode (g)
2,5	350	50-70	16,2	10,3
3,2	350	80-120	26,7	18,0
4,0	350	110-150	40,0	26,4
5,0	350	140-200	60,0	41,8

Anexo II.

ESPECIFICACIONES DEL ELECTRODO E7018

ELECTRODO BASICO BAJA ALEACION

B - 10

Norma:

AWS	E 7018
-----	--------

Análisis del Metal Depositado:
Características:

Color de Revestimiento: Gris	Identificación: Punta Blanca				
C	0.08%	Mn	1.0%	Si	0.6%

*Valores típicos

Electrodo con revestimiento de bajo hidrógeno, con polvo de hierro. Indicado para la soldadura de aceros de alta resistencia a la tracción (56 kg/mm² Máx) así como para aceros de construcción. Su arco es sumamente estable, poco chisporroteo y para mejores resultados úsese arco corto. Se recomienda mantener un arco corto para garantizar buenos resultados en inspecciones radiográficas. Para trabajos de alta responsabilidad es necesario secarlos a 350°C durante una hora.

Aprobación:

AMERICAN BUREAU OF SHIPPING

Propiedades Mecánicas:

Resistencia a la Tracción	Elongación	Resistencia al Impacto
54-57 kg/mm ²	30 - 34%	CHARPY-V
76.000		Joules
81.000 lbs/pulg ²		70 - 90 (-29°C)

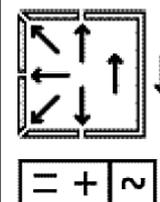
*Valores típicos

Posiciones de Soldar:

Plana, horizontal, sobrecabeza, vertical ascendente, vertical descendente.

Corriente y Polaridad:

Para corriente continua o alterna		
Electrodo al polo positivo		
ø mm	ø Pulg.	Amperaje
3.20	1/8	100-140
4.00	5/32	140-190
5.00	3/16	190-250



Aplicaciones:

- Para aceros de mediano y bajo carbono, baja aleación
- Para aceros laminados en frío, por sus características de resistencia a la deformación a altas temperaturas, su fácil manejo y óptimo rendimiento, es especialmente adecuado.
- Para soldadura de tuberías de vapor.
- Calderas de alta presión, tanques.
- Piezas para maquinaria pesada.
- Construcciones metálicas en obra.
- Reparaciones Navales.

IMPORTANTE:

Los electrodos húmedos o con manchas de grasa, deben destruirse.

LARGO: 350 mm.

PESO POR CAJA: 20 kg/44 lbs.

Anexo III.

ESPECIFICACIONES DEL MATERIAL DE APORTE ER80S

MIG & TIG

Oxford Alloy® 80S-B2

AWS ER80S-B2 • Chrome Moly

Key Features

- ❖ Designed for welding on 1-1/4 Cr / 1/2 Mo steels, which are used for high temperature service.
- ❖ Preheating and interpass temperatures of not less than 300°F must be used during welding.

Conformances

AWS/ASME SFA 5.28
ER80S-B2
UNS K20900

Chemical Composition - As required per AWS 5.28						
C	Mn	Si	Cr	Mo	P	S
0.07-0.12	0.40-0.70	0.40-0.70	1.20-1.50	0.40-0.65	0.025 max	0.025 max
Cu	Ni	OET				
0.35 max	0.20 max	0.50 max				

Mechanical Properties - As required by AWS 5.28			
	Tensile Strength MPa (ksi)	Yield Strength MPa (ksi)	Elongation %
AWS Requirements	515 (75) min	470 (68) min	19 min
Typical Results ^(a) - As welded	590 (86)	500 (73)	26



Typical Welding Parameters					
Diameter		Process	Volt	Amps	Shielding Gas
in	(mm)				
.035	0.9	GMAW	28-32	165-200	Spray Transfer 98% Argon + 2% Oxygen or 75% Argon + 25% CO ₂
.045	1.2	GMAW	30-34	180-220	
1/16	1.6	GMAW	30-34	230-260	
.035	0.9	GMAW	22-25	100-140	Short Circuiting Transfer 100% CO ₂ or 75% Argon + 25% CO ₂
.045	1.2	GMAW	23-26	120-150	
1/16	1.6	GMAW	23-26	160-200	
1/16	1.6	GTAW	12-15	100-125	100% Argon
3/32	2.4	GTAW	15-20	125-175	100% Argon
1/8	3.2	GTAW	15-20	175-250	100% Argon

Diameters & Packaging					
Oxford Alloys USA			Oxford Alloys Asia Pacific		
Diameter (in)	Form	Packaging (lbs)	Diameter (mm)	Form	Packaging (kg)
.035	GMAW	33 lb spool 1980 lb pallet	0.9	GMAW	15 kg spool 900 kg pallet
.045	GMAW	33 lb spool 1980 lb pallet	1.2	GMAW	15 kg spool 900 kg pallet
1/16	GMAW	33 lb spool 1980 lb pallet	1.6	GMAW	15 kg spool 900 kg pallet
1/16	GTAW	10 lb tube 40 lb carton	1.6	GTAW	5 kg tube 20 kg carton
3/32	GTAW	10 lb tube 40 lb carton	2.4	GTAW	5 kg tube 20 kg carton
1/8	GTAW	10 lb tube 40 lb carton	3.2	GTAW	5 kg tube 20 kg carton

^(a) Typical Results are based on Preheat, Interpass, and PWHT temperatures per AWS 5.28. Actual test results may vary. Refer test result disclaimer on page 160.

Anexo IV.

**REQUERIMIENTOS DEL GAS EMPLEADO EN EL
PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA GTAW-SMAW**

Ficha técnica

Propiedades Físicas

Peso molecular	39,948 g/mol	Punto de ebullición (1 atm)	-185,86 °C
Densidad del líquido (1 atm)	1,3928 kg/l	Presión crítica	48,98 bar
Densidad del gas (15°C, 1 atm)	1,691 kg/m ³	Temperatura crítica	-122,3 °C
Densidad del gas (0°C, 1 atm)	1,7836 kg/m ³	Gravedad específica (0°C 1 atm)*	1,38 kg/m ³

Envases Usuales ARGENTINA - COLOMBIA - CHILE - ECUADOR - PERÚ

CILINDROS Tamaño	Especificación DOT	Contenido		Presión de llenado a 15°C	
		Volumen m ³ (15°C, 1 atm)	Peso kg	bar	psig
207/52,5	E9001/E9370	11,0	18,6	198,0	2.870
200/50	200/300	10,0	16,9	200,0	2.900 ± 50
166/50	3AA 2400	9,0	15,2	170,5	2.475
139/44	3AA 2015	6,5	11,0	140,0	2.030
124/44	3AA 1800	6,0	10,1	129,0	1.870

Conexión de salida de la válvula: Ver al final

Termos Portátiles Especificación DOT 4-L200

Tamaño	Contenido	Peso vacío	Dimens. aprox.	Rendimiento			
m ³	kg	aprox.	alto	flujo cont.			
	l		diámetro				
196	126	213,1	161,5	116 kg	1,61 m	0,51 m	10 m ³ /hr

Factores de Conversión

Ar	Peso		Gas		Líquido	
	kg	lb	m ³ (15°C, 1 atm)	scf (70°F, 1 atm)	l (1 atm)	gas (1 atm)
1 kg	1	2,2046	0,5914	21,321	0,718	0,1897
1 lb	0,4536	1	0,2682	9,6712	0,3257	0,08603
1 m ³	1,691	3,728	1	36,06	1,2141	0,3207
1 scf	0,0469	0,1034	0,02773	1	0,03367	0,008896
1 l	1,3928	3,0706	0,8237	29,696	1	0,2642
1 gal	5,2723	11,623	3,1179	112,41	3,7854	1

Reguladores de presión recomendados

USO INDUSTRIAL

1 Etapa:	Harris 825 - 10 - AR
2 Etapas:	Harris 896 - 15 - AR
De línea:	Harris 847 - 10 - AR

ALTA PUREZA

1 Etapa:	Concoa Serie 302
2 Etapas:	Concoa Serie 312
De línea:	Concoa Serie 307

Anexo V.

**ESPECIFICACIONES DEL CLORURO FÉRRICO
HEXAHIDRATADO.**

ACS REAGENT CHEMICAL

Ferric Chloride Hexahydrate (Iron(III) Chloride Hexahydrate)

Part 4, Monographs for Reagent Chemicals: General Descriptions, Specifications, and Tests

eISBN: 9780841230460

Tom Tyler Chair, ACS Committee on Analytical Reagents

James Francis Secretary, ACS Committee on Analytical Reagents

ABSTRACT

This monograph for Ferric Chloride Hexahydrate provides, in addition to common physical constants, a general description including typical appearance, applications, change in state (approximate), and aqueous solubility. The monograph also details the following specifications and corresponding tests for verifying that a substance meets ACS Reagent Grade specifications including: Assay, Insoluble Matter, Nitrate, Sulfate, Phosphorus Compounds, Calcium, Copper, Magnesium, Potassium, Sodium, Zinc, and Ferrous Iron.

$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

Formula Wt 270.29

CAS No. 10025-77-1

GENERAL DESCRIPTION

Typical appearance	brownish-yellow deliquescent solid
Applications	clinical reagent (amino acids in urine)
Change in state (approximate)	melting point, 37 °C
Aqueous solubility	92 g in 100 mL

SPECIFICATIONS

Assay 97.0–102.0% $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

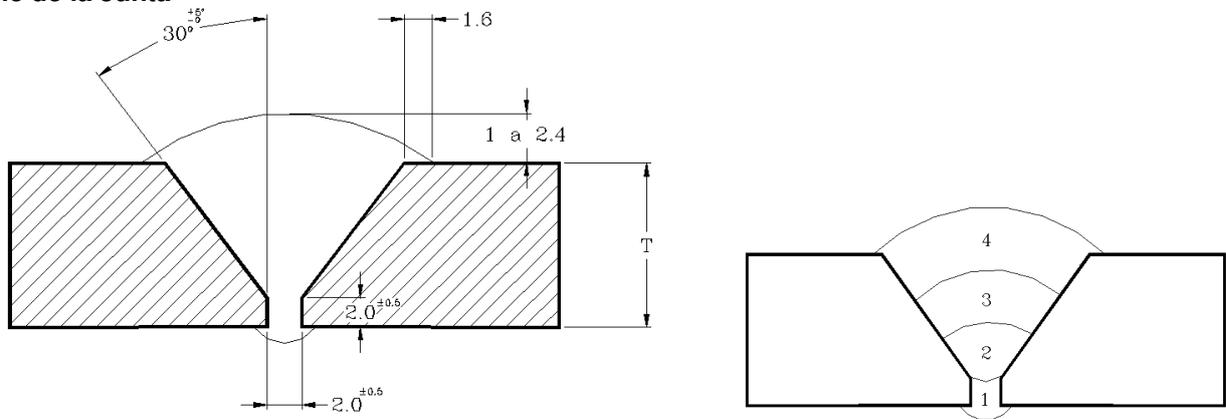
	Maximum Allowable
Insoluble matter	0.01%
Nitrate (NO_3^-)	0.01%
Sulfate (SO_4^{2-})	0.01%
Phosphorus compounds (as PO_4^{3-})	0.01%
Calcium (Ca)	0.01%
Copper (Cu)	0.003%
Magnesium (Mg)	0.005%

Anexo VI.

**ESPECIFICACIONES PARA PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA
SMAW-SMAW**

Nombre Compañía: EPN PQR No.: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx Según norma : ASME IX – 2001		No. Identificación: EPN.001 Fecha 10/10/2020 Realizado por: Catota-Majin Organización: Escuela Politécnica Nacional	
Artículo I. Junta Utilizada Tipo de junta: A tope Abertura raíz: 2.0 mm (+ 0.5, - 0.5 mm) Talón: 2.0 mm (+ 0.5, - 0.5 mm) Angulo de ranura 60° (+ 10°, - 0°) Placa de respaldo: si <input type="checkbox"/> no <input checked="" type="checkbox"/> Preparar bisel: si <input checked="" type="checkbox"/> no <input type="checkbox"/> Método: Torneado		Artículo II. Técnica de soldadura Proceso de soldadura: SMAW Tipo de Soldadura: Manual <input checked="" type="checkbox"/> Semiautomática <input type="checkbox"/> Automática <input type="checkbox"/> Soldadura a: Un lado <input checked="" type="checkbox"/> Dos lados <input type="checkbox"/> Cordón de respaldo: si <input type="checkbox"/> no <input checked="" type="checkbox"/> Limpieza: Pase raíz : Amoladora Pases siguientes : Cepillo metálico (grata)	
Artículo III. Metal Base Especificación: API 5L X56 M Grado PSL2 Espesor: 8.5 mm (1/3 inch) Diámetro: (20 inch)		Artículo V. Posición de Soldadura Posición de Soldadura: 6G Progresión: Ascendente Técnica: Un pase <input type="checkbox"/> Varios pases <input checked="" type="checkbox"/> Pre calentamiento N/A Tiempo entre pases N/A	
Artículo IV. Metal de Aporte Pase de Raíz Diámetro: 3.25 mm (1/8 inch) Denominación AWS: E 7010 A-1 Casa comercial: OERLIKON Denominación comercial: CELLOCORD 70T Pase de Relleno Diámetro: 2.38 mm (3/32 inch) Denominación AWS: E7018 Casa comercial: AGA Denominación comercial: AGA B-10 E7018		Artículo VI. Notas <ul style="list-style-type: none"> • Verificar alineación de la junta • Asegurar limpieza de las partes 	

Detalle de la Junta



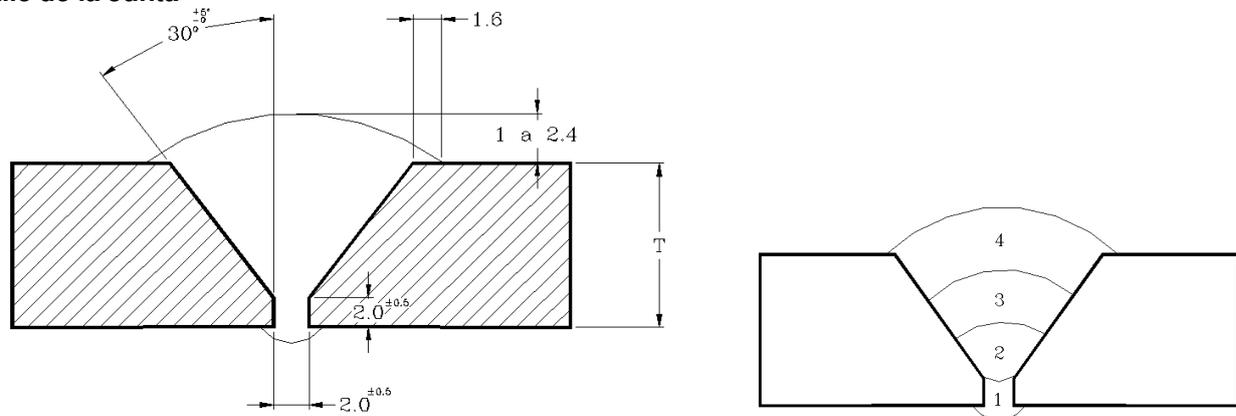
No de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. De avance (mm/min)	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad.	Intensidad (Amperios)			oscilado	recto
1	E 7010	3.2	DC ⁺	80-120	22-24	1.74 mm/s		X
2	E 7018	2.38	DC ⁺	90	22	1.02 mm/s		X
3-n	E 7018	2.38	DC ⁺	90	22	1.37 mm/s		X

Anexo VII.

**ESPECIFICACIONES PARA PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA
GTAW-SMAW**

Nombre Compañía: EPN PQR No.: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx Según norma : ASME IX – 2001		No. Identificación: EPN.001 Fecha 10/10/2020 Realizado por: Catota-Majin Organización: Escuela Politécnica Nacional	
Artículo I. Junta Utilizada Tipo de junta: A tope Abertura raíz: 2.0 mm (+ 0.5, - 0.5 mm) Talón: 2.0 mm (+ 0.5, - 0.5 mm) Angulo de ranura 60° (+ 10°, - 0°) Placa de respaldo: si <input type="checkbox"/> no <input checked="" type="checkbox"/> Preparar bisel: si <input checked="" type="checkbox"/> no <input type="checkbox"/> Método: Torneado		Artículo II. Técnica de soldadura Proceso de soldadura: GTAW-SMAW Tipo de Soldadura: Manual <input checked="" type="checkbox"/> Semiautomática <input type="checkbox"/> Automática <input type="checkbox"/> Soldadura a: Un lado <input checked="" type="checkbox"/> Dos lados <input type="checkbox"/> Cordón de respaldo: si <input type="checkbox"/> no <input checked="" type="checkbox"/> Limpieza: Pase raíz : Amoladora Pases siguientes : Cepillo metálico (grata) Gas de protección: Argón	
Artículo III. Metal Base Especificación: API 5L X56 M Grado PSL2 Espesor: 8.5 mm (1/3 inch) Diámetro: (20 inch)			
Artículo IV. Metal de Aporte Pase de Raíz Diámetro: 2.38 mm (3/32 inch) Denominación AWS: ER80S-B2 Casa comercial: OXFORD ALLOYS Denominación comercial: ER80S-B2 Pase de Relleno Diámetro: 2.38 mm (3/32 inch) Denominación AWS: E7018 Casa comercial: AGA Denominación comercial: AGA B-10 E7018		Artículo V. Posición de Soldadura Posición de Soldadura: 6G Progresión: Ascendente Técnica: Un pase <input type="checkbox"/> Varios pases <input checked="" type="checkbox"/> Pre calentamiento N/A Tiempo entre pases N/A	
		Artículo VI. Notas <ul style="list-style-type: none"> • Verificar alineación de la junta • Asegurar limpieza de las partes 	

Detalle de la Junta



No de pase	Metal de aporte		Corriente		Tensión de trabajo (Voltios)	Vel. De avance (mm/s)	Técnica de soldadura	
	Clase	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad.	Intensidad (Amperios)			oscilado	recto
1	ER80S	2.38	DC ⁻	70-80	9-11	1.12	X	
2	E 7018	2.38	DC ⁺	80-90	22-24	2.05		X
3-n	E 7018	2.38	DC ⁺	80-90	22-24	2.05		X

Anexo VIII.

**PROTOCOLO PARA LA TOMA DE DATOS DEL ENSAYO DE
CORROSIÓN POR INMERSIÓN.**

DIA
PROCEDIMIENTO DE ENSAYO DE CORROSIÓN
PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

HORA DE INICIO
HORA FINAL
TIEMPO DE DURACIÓN

PREPARACIÓN DE ENSAYO

Limpieza de probetas con jabon, enjuague con abundante agua, añadir alcohol y secado.
Protección de áreas sin exposición del agente corrosivo.
Aplicación de tensión a probetas ASTM G-58
Aislamiento de las probetas con otros metales para evitar corrosión galvanica.
Identificación de las probetas.
Preparación de la solucion de Cloruro Férrico Hexahidratado 80g en 1000 ml de agua destilada

PROCEDIMIENTO ENSAYO

- 1 Medición de las condiciones ambientales iniciales.
- 2 Medición de la masa inicial de la probeta patrón* y de cada una de las probetas.
- 3 Ubicación de las 5 probetas sobre el eje de sujeción con una separación de 2 cm
- 4 Aseguramiento de las probetas sobre el eje para evitar contacto entre ellas.
- 5 Medición del Ph inicial de la solución corrosiva.
- 6 Inmersión de las probetas en la solución corrosiva dentro del contenedor plástico.
- 7 Exposición de las probetas a corrosión durante 24 h.
- 8 Retirar las probetas del eje de sujeción después del tiempo establecido.
- 9 Medición del Ph final de la solución corrosiva
- 10 Limpieza del área de exposición de las probetas con alcohol y cepillo para posterior
- 11 Medición de la masa final de la probeta patrón* y cada una de las probetas.
- 12 Observación de presencia picaduras y grietas en las probetas.
- 13 Documentación fotográfica de las probetas ensayadas donde se observen la

TOMA DE DATOS

CONDICIONES AMBIENTALES			
Temperatura Inicial		Temperatura final	
Humedad inicial		Humedad final	
Presión inicial		Presión final	

SOLUCIÓN CORROSIVA			
Ph inicial		Ph final	
Volumen			
Concetració	160g cloruro férrico	2000ml agua destilada	

MEDICIÓN DE MASA

Identificación	Masa inicial			Masa Final		
	mo 1 [g]	mo 2 [g]	mo 3 [g]	m1 [g]	m2 [g]	m3 [g]

Anexo IX.

**INFORME LAEV –M20.076 EMMITIDO POR EL LABORATORIO DE
ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES E INFORME EMITIDO
POR EL LABORATORIO DE FUNDICIÓN**



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
MECÁNICA



LABORATORIO DE ANÁLISIS
DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES

F01-PE-LAEV-01 Rev.00

INFORME

LAEV – M20.076

Quito, 8 de diciembre de 2020

Solicitado por: Msc. Carlos Díaz
Persona de contacto: Evelyn Majin, Bryan Catota
Teléfono: 0999077546
Correo: bryan.catota@epn.edu.ec
Fecha de recepción: 30/11/2020
Fecha de ejecución: 02/12/2020

ORDEN DE TRABAJO N°: DM-OTI0089-2020

1. **MUESTRAS:** Ochos (8) probetas metálicas soldadas para ensayo de tracción, cuatro (4) probetas de juntas soldadas para ensayo de doblado de cara y dos (2) probetas de material base para ensayo de tracción.

2. **GENERALIDADES E IDENTIFICACIÓN:**

La siguiente descripción fue proporcionada por el cliente:

Título de la tesis: ESTUDIO DEL EFECTO CORROSIVO EN JUNTAS SOLDADAS DE ACERO API 5LX56 SOMETIDAS A TENSIÓN E INMERASAS EN SOLUCIÓN DE CLORURO FÉRRICO PARA PROCESOS SMAW Y GTAW - SMAW

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

Tabla 1. Identificación de las muestras

Id. cliente	Id. LAEV
20-051-IA-11 TT - 20-051-IIA-11 TT	M20.076.01 - M20.076.02
20-051-IB-11 TT - 20-051-IIB-11 TT	M20.076.03 - M20.076.04
20-051-IC-11 TT - 20-051-IIC-11 TT	M20.076.05 - M20.076.06
20-051-ID-11 TT - 20-051-IID-11 TT	M20.076.07 - M20.076.08
D1 – D4 (doblado de cara)	M20.076.09 - M20.076.12
20-051-MB-1 TT - 20-051-MB-2 TT	M20.076.13 - M20.076.14

3. CONDICIONES AMBIENTALES:

Temperatura: $16,7 \pm 0,7$ °C

Humedad relativa: $66,1 \pm 1,7$ %

4. ENSAYO DE TRACCIÓN EN JUNTAS SOLDADAS

En la tabla 2 se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de tracción.

Tabla 2. Ensayo de tracción

Id.	Ancho Promedio	Espesor Promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		Obs.
	mm	mm	lbf	N	ksi	MPa	
M20.076.01	24,96	7,92	24 548	109 195	80,1	552,4	FMB
M20.076.02	26,85	7,78	25 134	111 800	77,6	535,2	FJS
M20.076.03	26,39	7,86	24 692	109 834	76,8	529,5	FMB
M20.076.04	25,56	7,90	24 398	108 530	78,0	537,5	FMB
M20.076.05	25,76	7,85	24 909	110 801	79,5	547,9	FMB
M20.076.06	26,30	7,79	24 782	110 238	78,0	538,1	FMB
M20.076.07	26,44	7,90	24 711	109 918	76,3	526,2	FMB
M20.076.08	25,50	7,81	24 184	107 576	78,3	540,2	FMB

*FMB = Falla en el material base

*FJS = Falla en la junta soldada

5. ENSAYO DE DOBLADO DE CARA EN JUNTAS SOLDADAS

En la tabla 3 se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de doblado.

Tabla 3. Ensayo de doblado de cara en juntas soldadas.

Id. LAEV	Carga máxima registrada		Observaciones
	lbf	N	
M20.076.09	3 545	15 769	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura
M20.076.10	2 944	13 096	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura
M20.076.11	2 646	11 770	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura
M20.076.12	2 225	9 897	No se observan discontinuidades en el cordón de soldadura

6. ENSAYO DE TRACCIÓN MATERIAL BASE

En la tabla 4 se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de tracción.

Tabla 4. Ensayo de tracción a material base

Id.	Ancho promedio	Espesor Promedio	Carga máxima registrada		Límite de fluencia		Resistencia a la tracción		% elongación en 50 mm
	mm	mm	lbf	N	ksi	MPa	ksi	MPa	
M20.079.13	38,05	7,95	40 232	178 959	73,8	509,0	85,8	592,7	22,8
M20.079.14	38,09	7,84	37 263	165 754	67,4	464,7	80,5	556,1	36,2

Nota.- Los resultados contenidos en el presente informe corresponden únicamente a las muestras ensayadas por el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones (LAEV). Además, los valores de fuerza que se emiten en el presente documento (y con los que se ha evaluado la conformidad) corresponden a valores corregidos en función del último certificado de calibración del equipo de fuerza y no se ha utilizado el valor de la incertidumbre.

	REVISADO POR:	APROBADO POR:
Firma:	 <p>Firmado electrónicamente por: JONATHAN FERNANDO CASTRO REVELO</p>	
Nombre:	Ing. Jonathan Castro, M.Sc.	Ph.D. Wilson Guachamín
Cargo:	ESPECIALISTA DE LABRATORIO	JEFE
LABORATORIO DE ANALISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES		



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

DEPARTAMENTO DE MATERIALES

LABORATORIO DE FUNDICIÓN

INFORME TÉCNICO



Solicitado por: Ing. Carlos Wime Díaz Msc.

Tipo de Trabajo: Espectrometría por chispa

Fecha: 03 de diciembre del 2020

Realizado por: Ing. Oscar Sotomayor/Ing. Luis G. Huilca

Descripción: Muestra de material metálico

1. ANTECEDENTES.

Se recibe en el Laboratorio de Fundición de la Escuela Politécnica Nacional una probeta de material metálico.

Se solicita realizar la prueba de espectrometría con la finalidad de determinar los componentes presentes en la muestra entregada.

2. IDENTIFICACIÓN DE LA PROBETA.

La probeta para el análisis correspondiente es identificada como se muestra a continuación:

Nombre	Identificación de la probeta	Identificación Gráfica
MUESTRA METÁLICA	Sample M1	

3. ANTECEDENTES TÉCNICOS

3.1. Limpieza Superficial: Según norma ASTM E415 – 17 Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry

3.2. Método: Fe 110 Low alloy

4. VALORES OBTENIDOS

El análisis de espectrometría por chispa se realiza empleando el espectrómetro marca BRUKER modelo Q2 ION. Para el análisis se tomaron 2 mediciones en distintos puntos del espécimen y finalmente se promedió su valor.

		Muestra M1
Elemento		Valor [%]
Carbono	[C]	0,103
Silicio	[Si]	0,057
Manganeso	[Mn]	1,079
Fósforo	[P]	0,018
Azufre	[S]	0,013
Cromo	[Cr]	0,125
Níquel	[Ni]	0,012
Aluminio	[Al]	0,033
Niobio	[Nb]	0,021
Titanio	[Ti]	0,018
Hierro	[Fe]	98,51
Total		99,99



Ing. Luis G. Huilca

Técnico Responsable



Ing. Oscar Sotomayor

**Jefe del Laboratorio de
Fundición,**



Con la finalidad de mejorar nuestros servicios, solicitamos de la manera más comedida se llene la encuesta mediante la captura del código QR adjunto, agradecemos su colaboración.

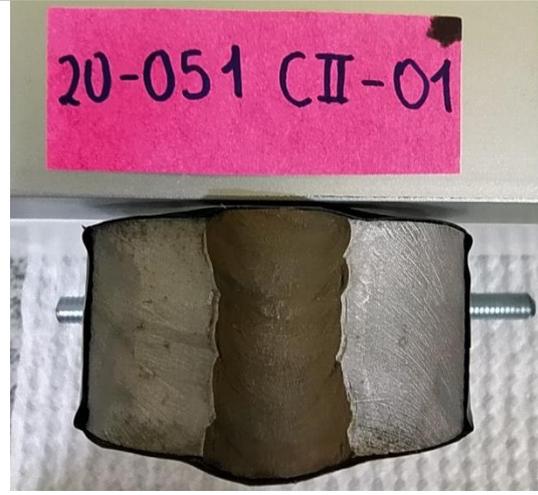
Anexo X.

MACROGRAFÍAS DE PROBETAS CON PROCEDIMIENTO SMAW-SMAW Y GTAW-SMAW SOMETIDAS A CORROSIÓN.

CII-01



Tiempo de exposición : 0 horas



Tiempo de exposición : 24 horas



Tiempo de exposición : 48 horas



Tiempo de exposición : 72 horas



Tiempo de exposición : 96 horas



Tiempo de exposición : 120 horas



Tiempo de exposición : 144 horas



Tiempo de exposición : 168 horas



Tiempo de exposición : 192 horas

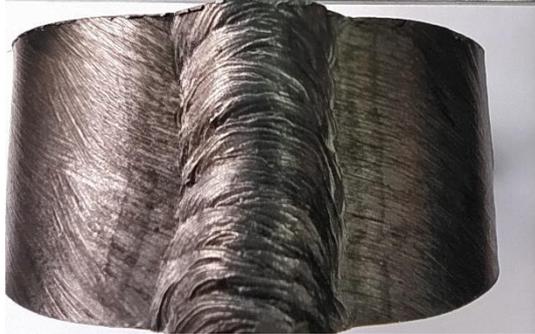


Tiempo de exposición : 216 horas

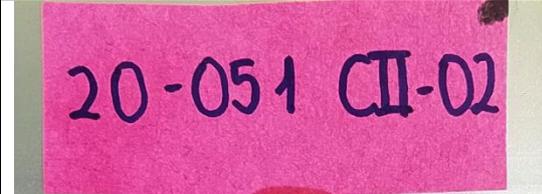


Tiempo de exposición : 240 horas

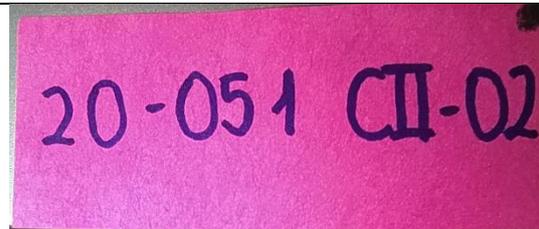
CII-02



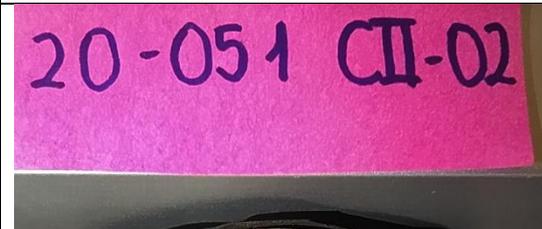
Tiempo de exposición : 0 horas



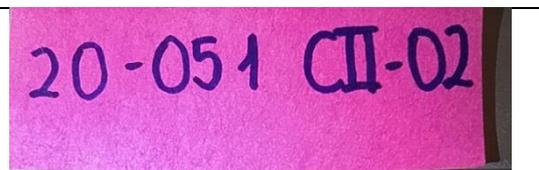
Tiempo de exposición : 24 horas



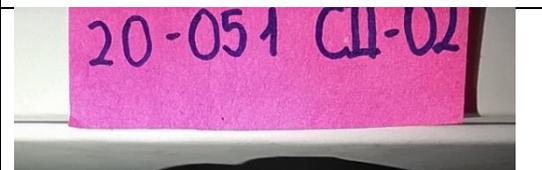
Tiempo de exposición : 48 horas



Tiempo de exposición : 72 horas



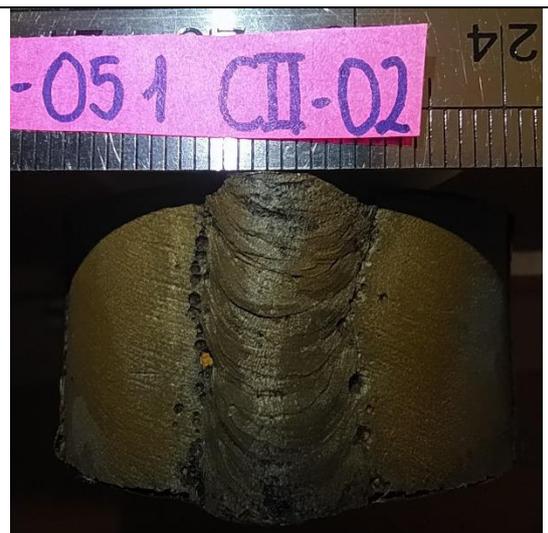
Tiempo de exposición : 96 horas



Tiempo de exposición : 120 horas



Tiempo de exposición : 144 horas



Tiempo de exposición : 168 horas



Tiempo de exposición : 192 horas



Tiempo de exposición : 216 horas



Tiempo de exposición : 240 horas

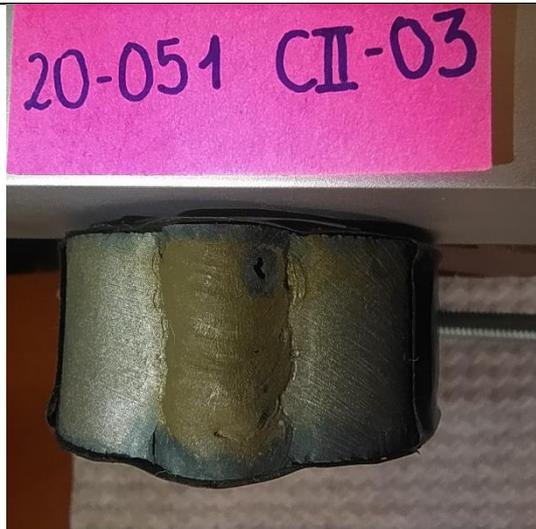
CII-03



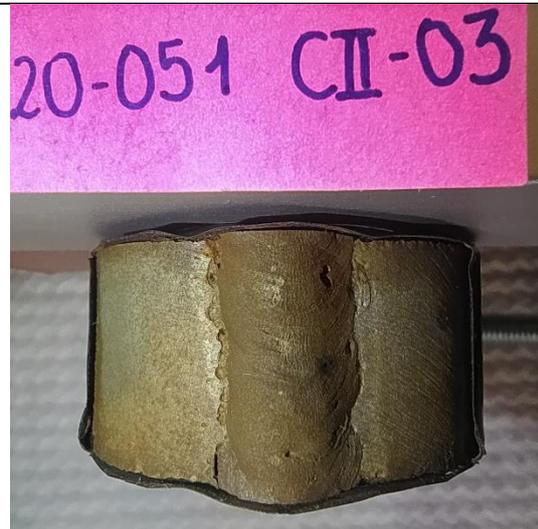
Tiempo de exposición : 0 horas



Tiempo de exposición : 24 horas



Tiempo de exposición : 48 horas



Tiempo de exposición : 72 horas



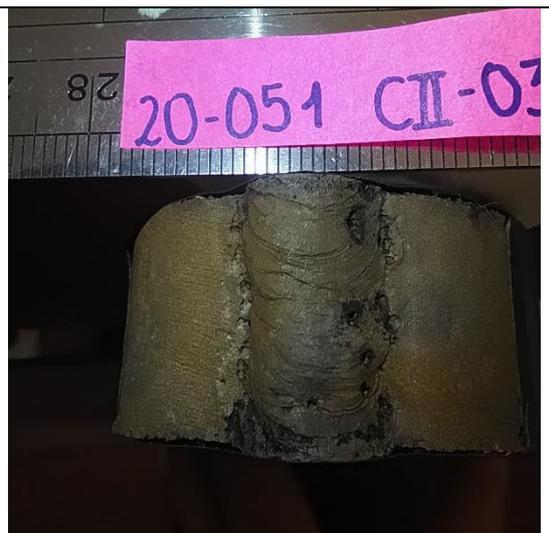
Tiempo de exposición : 96 horas



Tiempo de exposición : 120 horas



Tiempo de exposición : 144 horas



Tiempo de exposición : 168 horas



Tiempo de exposición : 192 horas



Tiempo de exposición : 216 horas

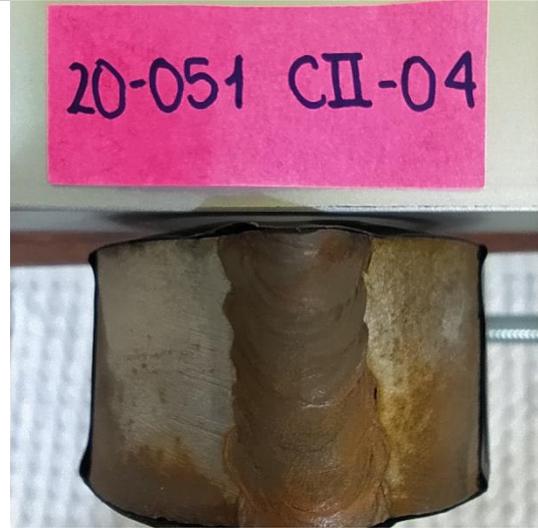


Tiempo de exposición : 240 horas

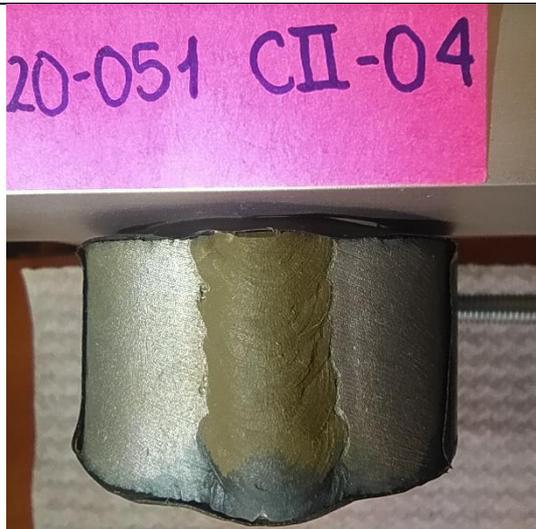
CII-04



Tiempo de exposición : 0 horas



Tiempo de exposición : 24 horas



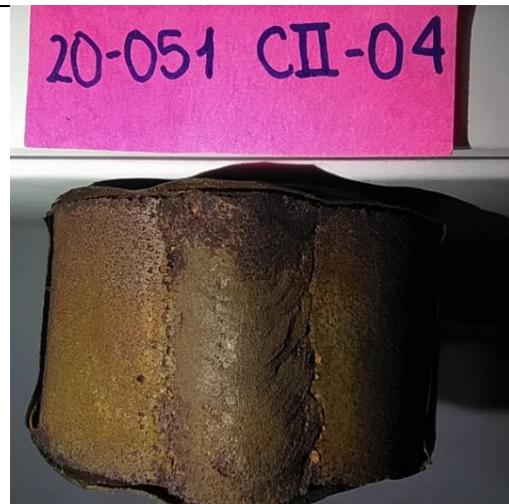
Tiempo de exposición : 48 horas



Tiempo de exposición : 72 horas



Tiempo de exposición : 96 horas



Tiempo de exposición : 120 horas



Tiempo de exposición : 144 horas



Tiempo de exposición : 168 horas



Tiempo de exposición : 192 horas



Tiempo de exposición : 216 horas

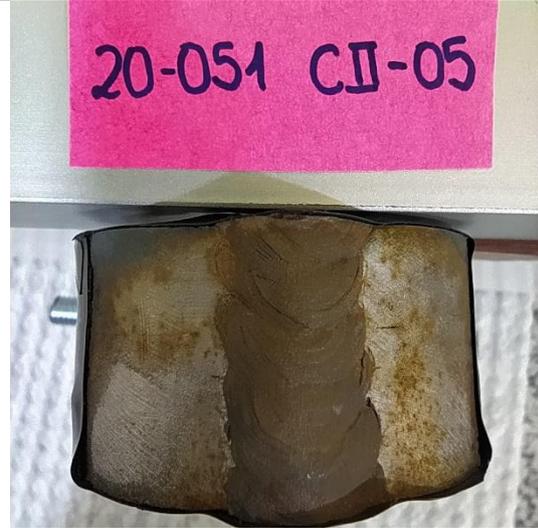


Tiempo de exposición : 240 horas

CII-05



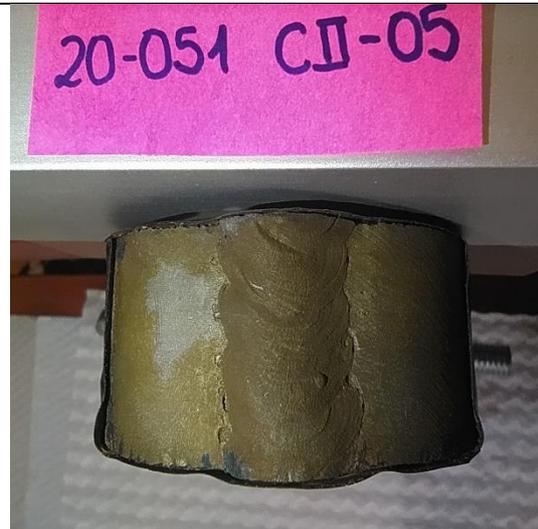
Tiempo de exposición : 0 horas



Tiempo de exposición : 24 horas



Tiempo de exposición : 48 horas



Tiempo de exposición : 72 horas



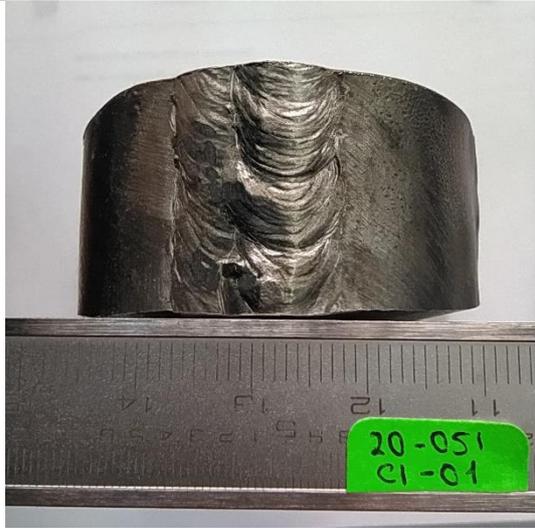
Tiempo de exposición : 96 horas



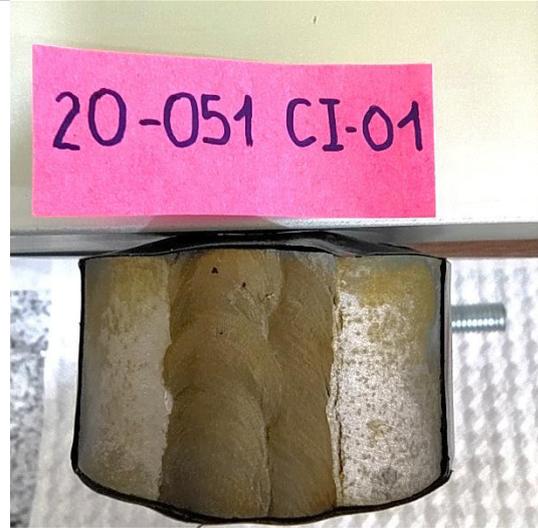
Tiempo de exposición : 120 horas

	
<p>Tiempo de exposición : 144 horas</p>	<p>Tiempo de exposición : 168 horas</p>
	
<p>Tiempo de exposición : 192 horas</p>	<p>Tiempo de exposición : 216 horas</p>
	
<p>Tiempo de exposición : 240 horas</p>	

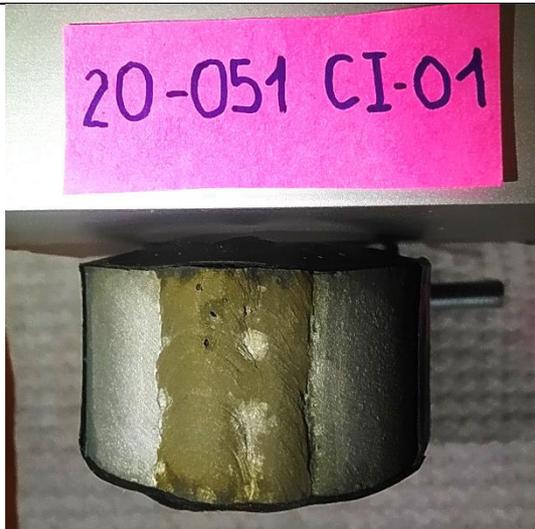
CI-01



Tiempo de exposición : 0 horas



Tiempo de exposición : 24 horas



Tiempo de exposición : 48 horas



Tiempo de exposición : 72 horas



Tiempo de exposición : 96 horas



Tiempo de exposición : 120 horas

 <p>1 CI-01.</p> <p>A cylindrical metal sample with a dark, greyish-brown surface, showing some texture and a vertical crack. A ruler is visible above the sample.</p>	 <p>CI-01.</p> <p>The sample is more yellowish-brown and shows more pronounced surface corrosion and a vertical crack. A ruler is visible above the sample.</p>
<p>Tiempo de exposición : 144 horas</p>	<p>Tiempo de exposición : 168 horas</p>
 <p>1 CI-01.</p> <p>The sample is significantly more yellowish and shows extensive surface corrosion and a vertical crack. A ruler is visible above the sample.</p>	 <p>1 CI-01.</p> <p>The sample is very yellowish and shows severe surface corrosion and a vertical crack. A ruler is visible above the sample.</p>
<p>Tiempo de exposición : 192 horas</p>	<p>Tiempo de exposición : 216 horas</p>
 <p>20-051 CI-01.</p> <p>The sample is extremely yellowish and shows very severe surface corrosion and a vertical crack. A ruler is visible below the sample.</p>	<p>(Empty cell)</p>
<p>Tiempo de exposición : 240 horas</p>	<p>(Empty cell)</p>

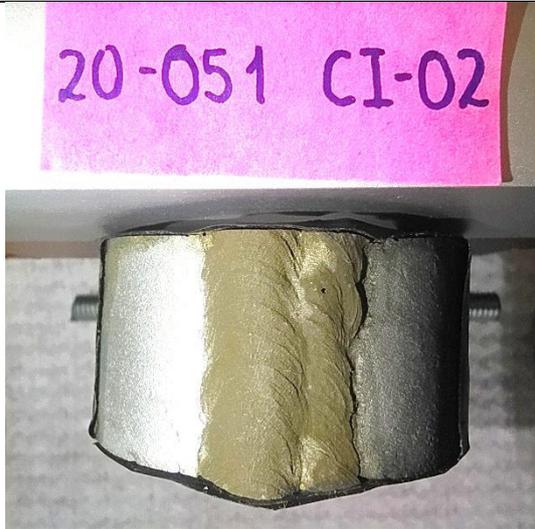
CI-02



Tiempo de exposición : 0 horas



Tiempo de exposición : 24 horas



Tiempo de exposición : 48 horas



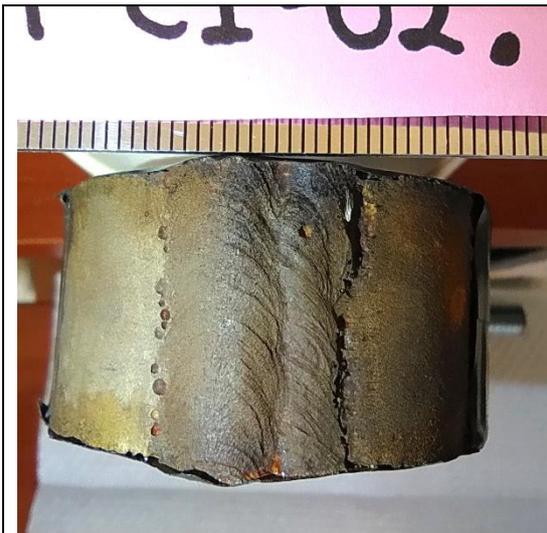
Tiempo de exposición : 72 horas



Tiempo de exposición : 96 horas



Tiempo de exposición : 120 horas



Tiempo de exposición : 144 horas



Tiempo de exposición : 168 horas



Tiempo de exposición : 192 horas



Tiempo de exposición : 216 horas

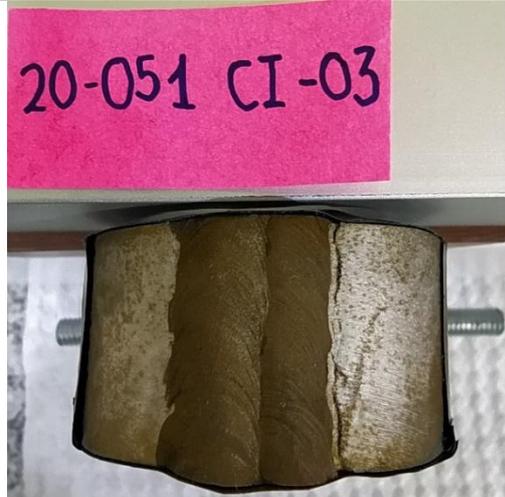


Tiempo de exposición : 240 horas

CI-03



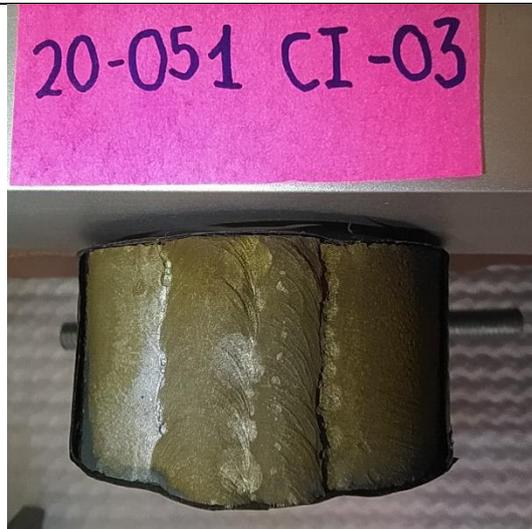
Tiempo de exposición : 0 horas



Tiempo de exposición : 24 horas



Tiempo de exposición : 48 horas



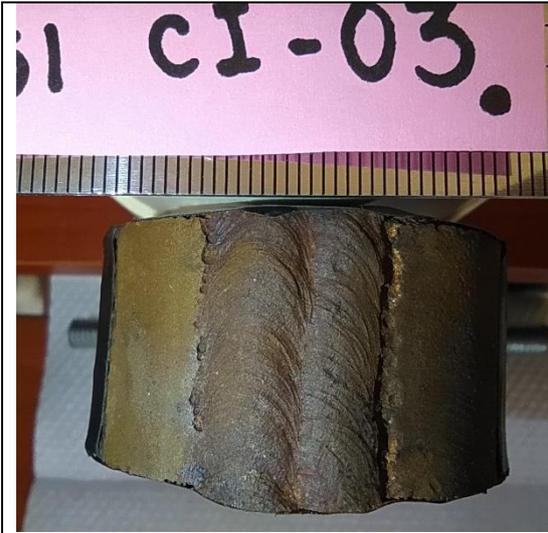
Tiempo de exposición : 72 horas



Tiempo de exposición : 96 horas



Tiempo de exposición : 120 horas



Tiempo de exposición : 144 horas



Tiempo de exposición : 168 horas



Tiempo de exposición : 192 horas



Tiempo de exposición : 216 horas

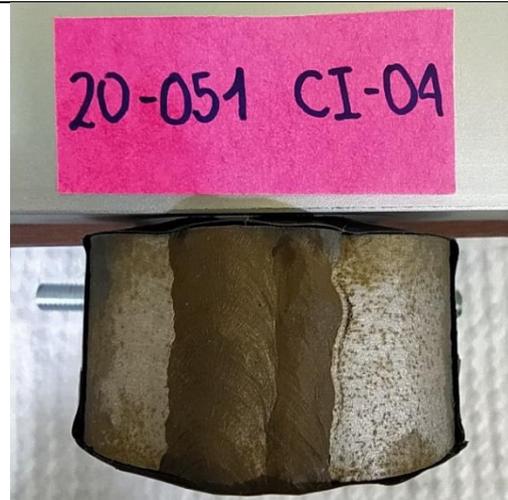


Tiempo de exposición : 240 horas

CI-04



Tiempo de exposición : 0 horas



Tiempo de exposición : 24 horas



Tiempo de exposición : 48 horas



Tiempo de exposición : 72 horas



Tiempo de exposición : 96 horas



Tiempo de exposición : 120 horas



Tiempo de exposición : 144 horas



Tiempo de exposición : 168 horas



Tiempo de exposición : 192 horas



Tiempo de exposición : 216 horas

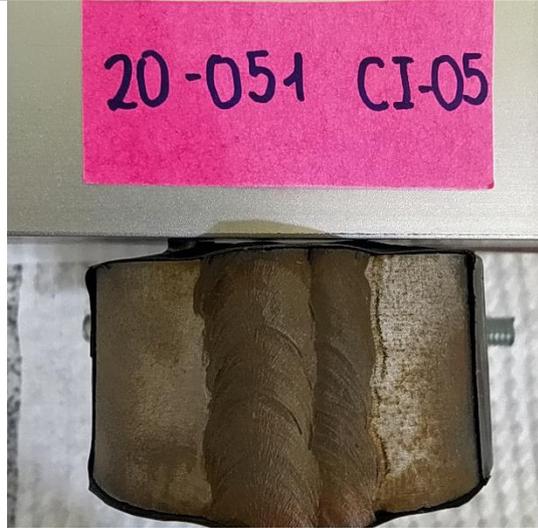


Tiempo de exposición : 240 horas

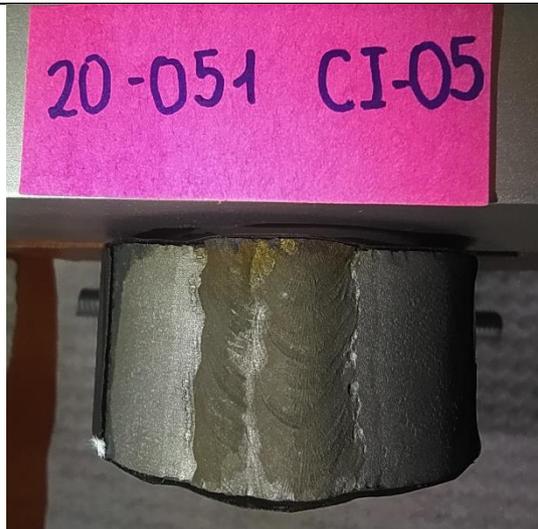
CI-05



Tiempo de exposición : 0 horas



Tiempo de exposición : 24 horas

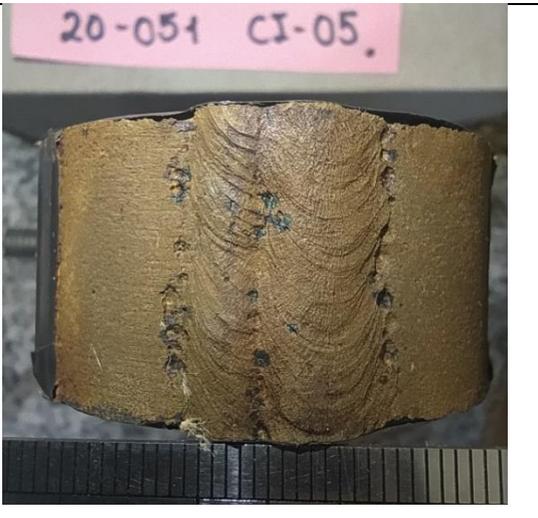


Tiempo de exposición : 48 horas



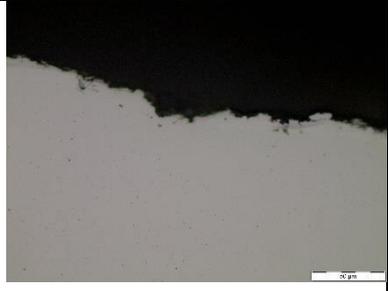
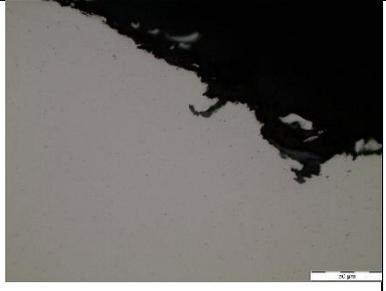
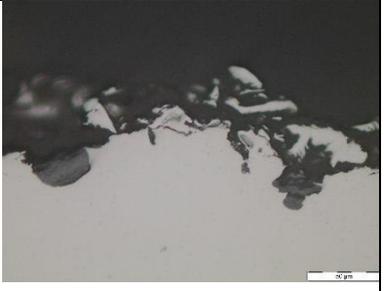
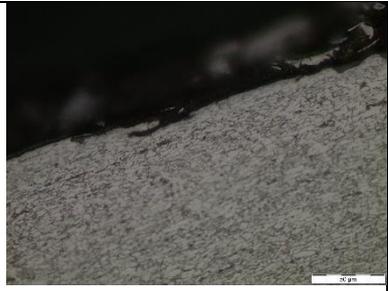
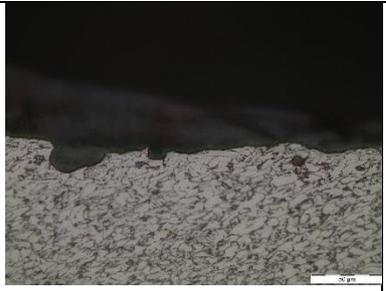
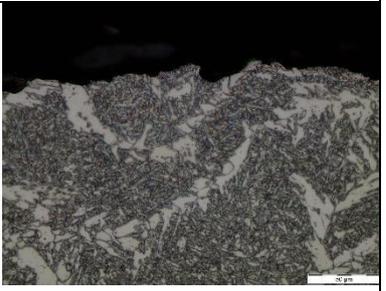
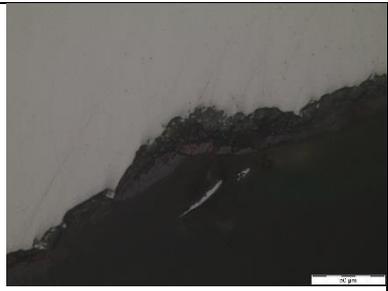
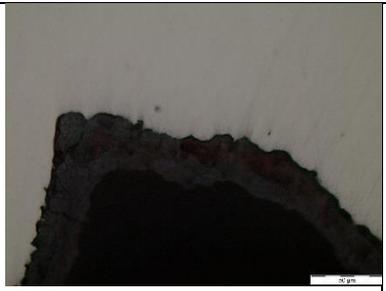
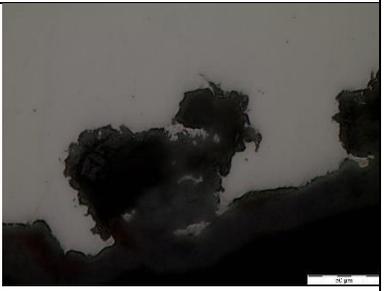
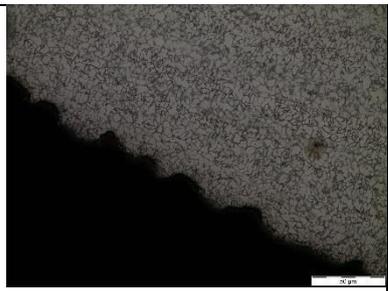
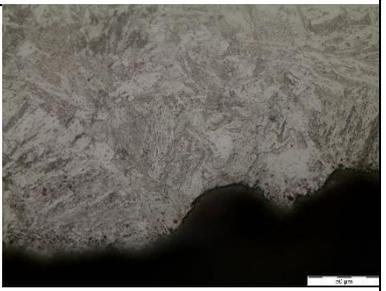
Tiempo de exposición : 72 horas



Tiempo de exposición : 96 horas	Tiempo de exposición : 120 horas
 <p>CI-05.</p>	 <p>51 CI-05.</p>
Tiempo de exposición : 144 horas	Tiempo de exposición : 168 horas
 <p>CI-05.</p>	 <p>20-051 CI-05.</p>
Tiempo de exposición : 192 horas	Tiempo de exposición : 216 horas
 <p>20-051 CI-05.</p>	
Tiempo de exposición : 240 horas	

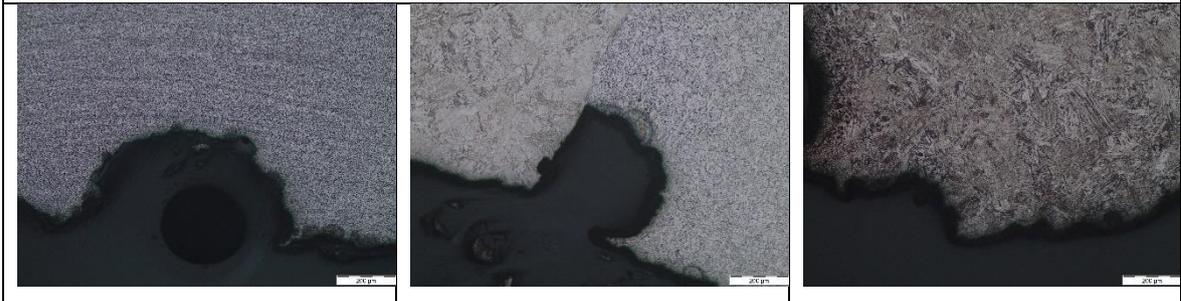
Anexo XI.

**MICROGRAFÍAS DE ENSAYO DE CORROSIÓN DE LAS
PROBETAS SOLDADAS CON PROCEDIMIENTO SMAW-SMAW Y
GTAW-SMAW**

Probeta 20-051-CI-01		
Material Base	ZAC	Material de Aporte
Superior X500 sin ataque químico		
		
Superior X500 con ataque químico		
		
Inferior X500 sin ataque químico		
		
Inferior X500 con ataque químico		
		
Superior X100 con ataque químico		



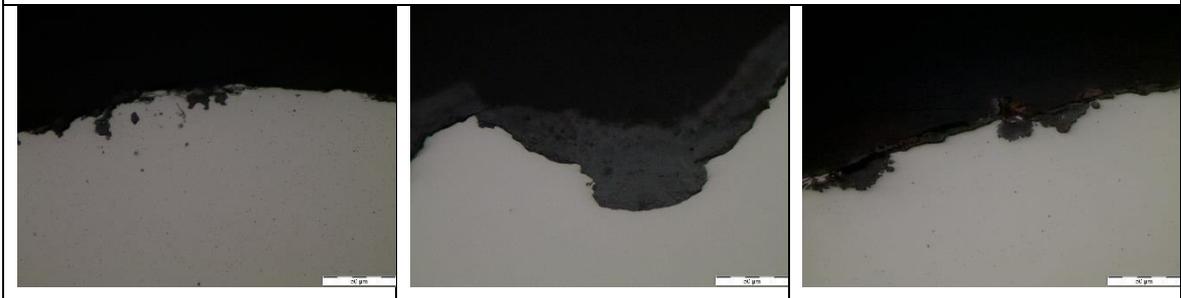
Inferior X100 con ataque químico



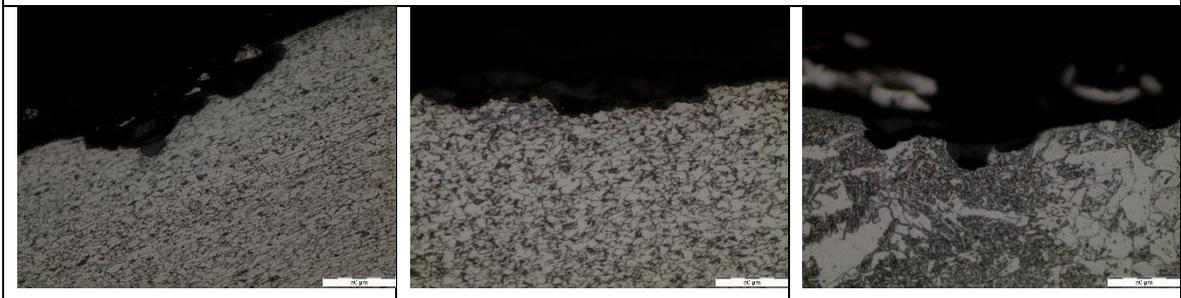
Probeta 20-051-CI-02

Material Base	ZAC	Material de Aporte
---------------	-----	--------------------

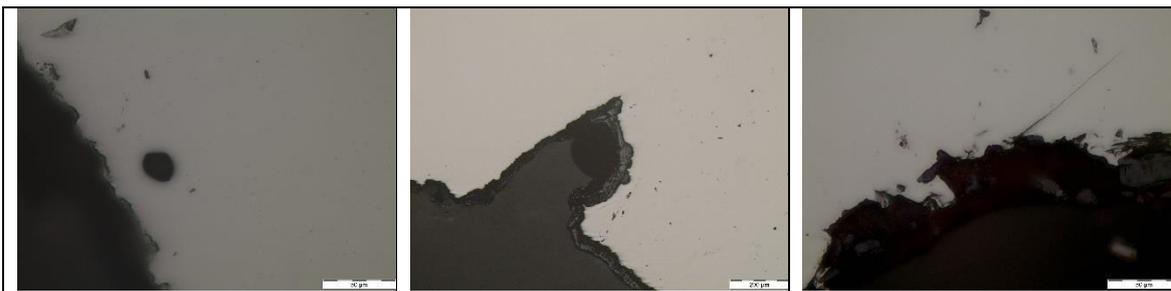
Superior X500 sin ataque químico



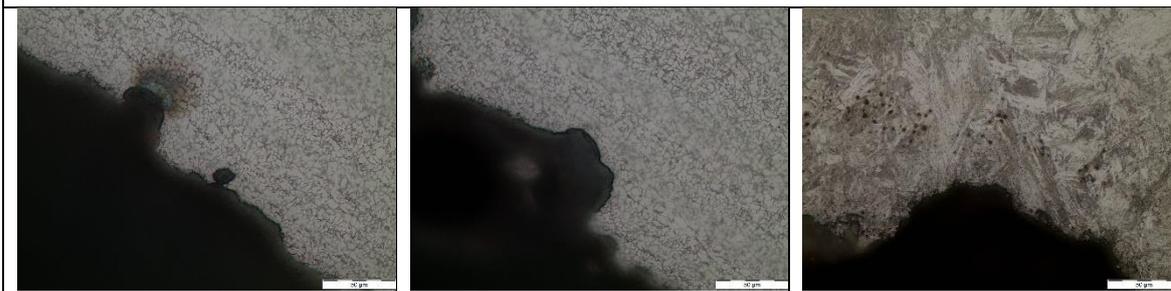
Superior X500 con ataque químico



Inferior X500 sin ataque químico



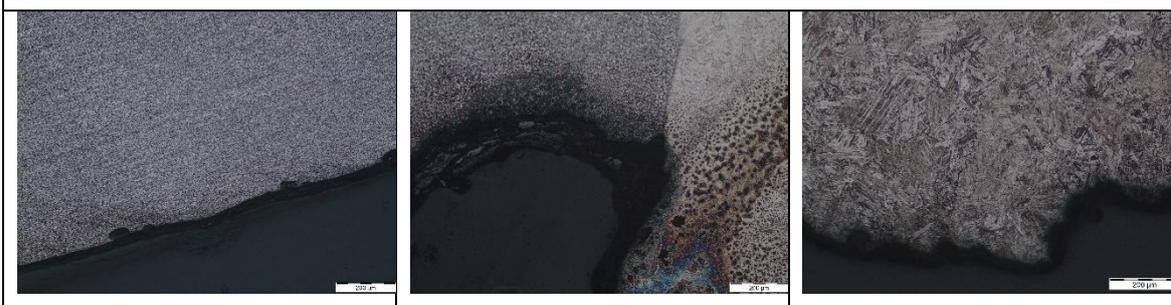
Inferior X500 con ataque químico



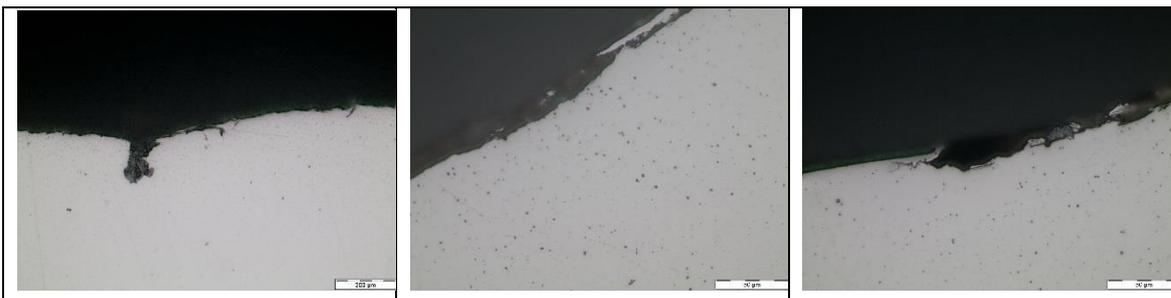
Superior X100 con ataque químico



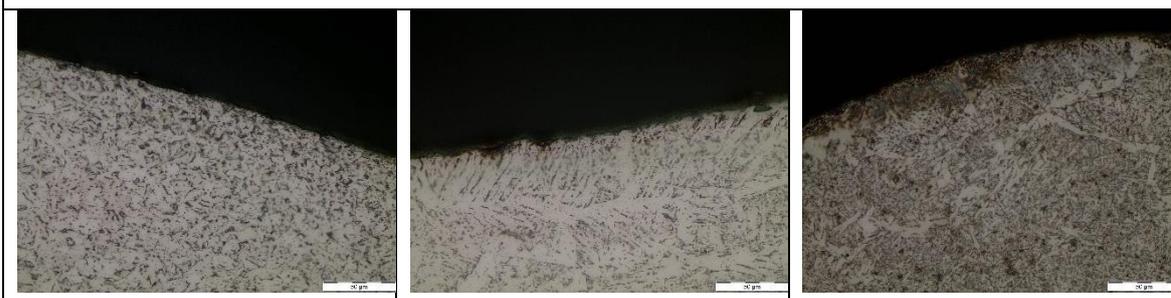
Inferior X100 con ataque químico



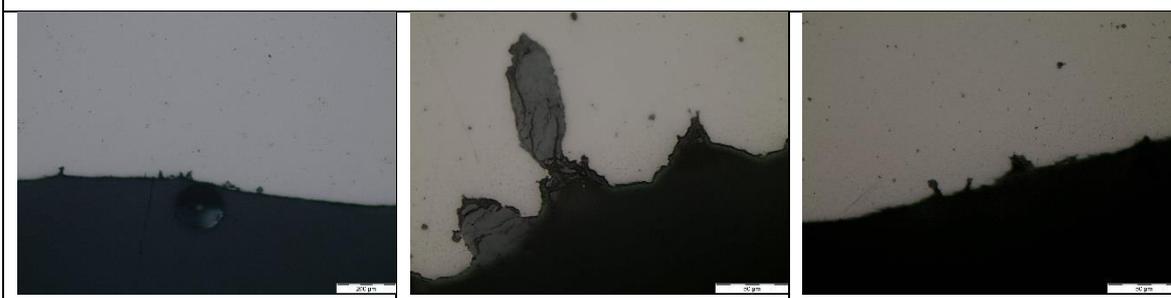
Probeta 20-051-CI-06		
Material Base	ZAC	Material de Aporte
Superior X500 sin ataque químico		



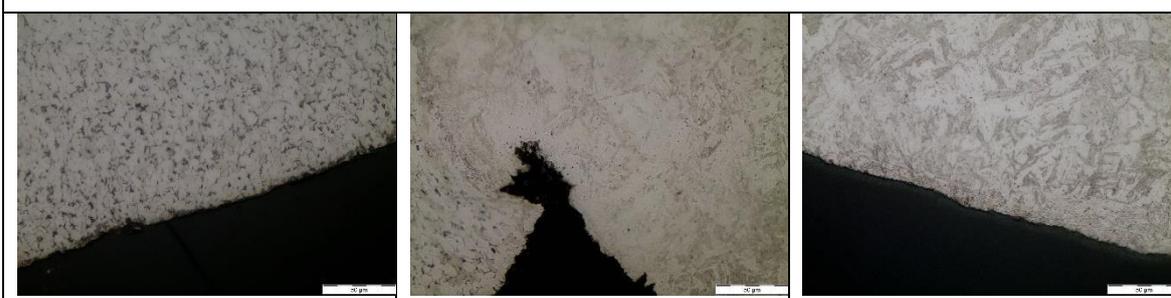
Superior X50 con ataque químico



Inferior X50 sin ataque químico



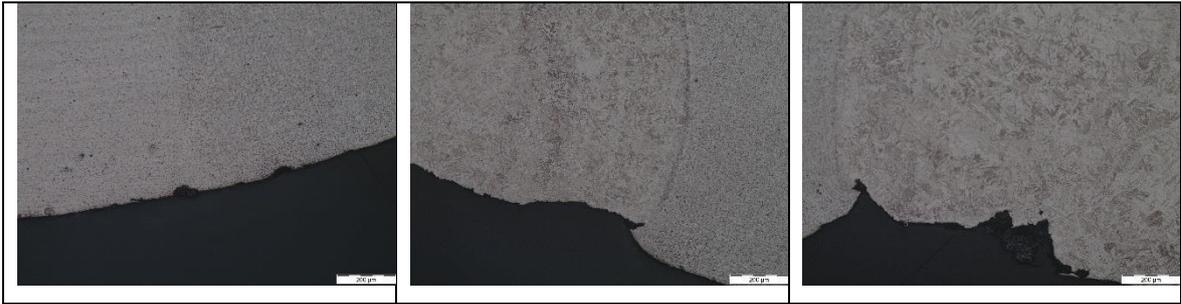
Inferior X50 con ataque químico

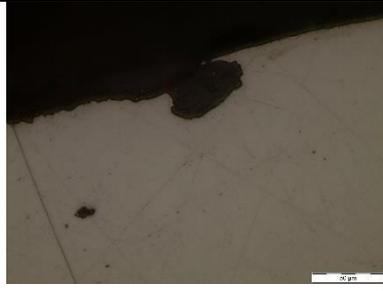
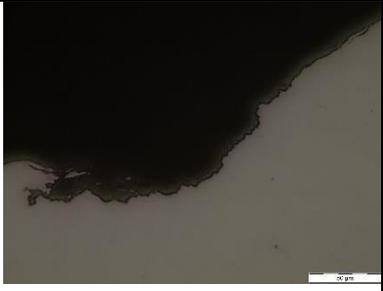
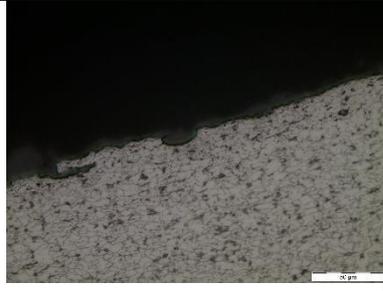
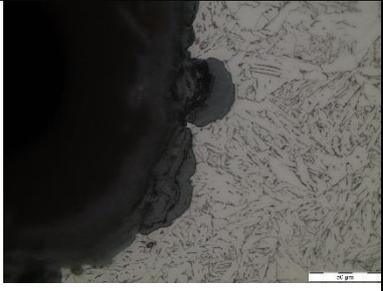
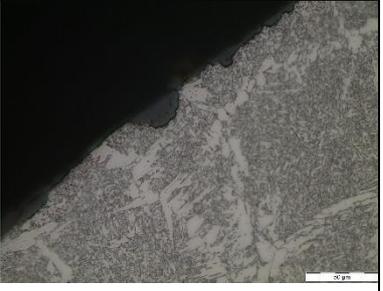
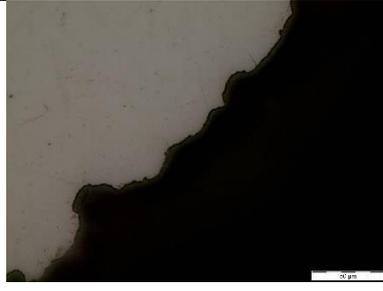
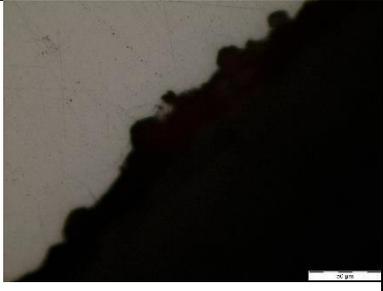


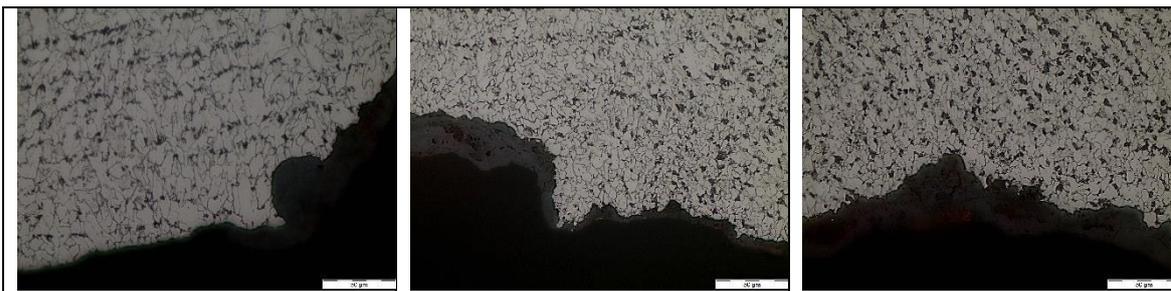
Superior X100 con ataque químico



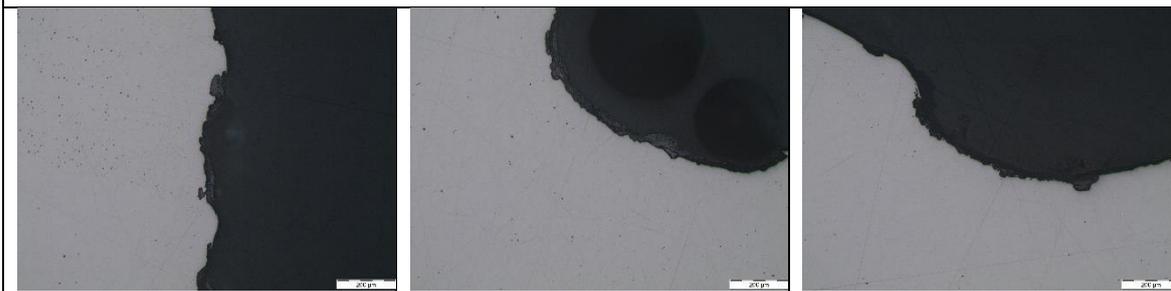
Inferior X100 con ataque químico



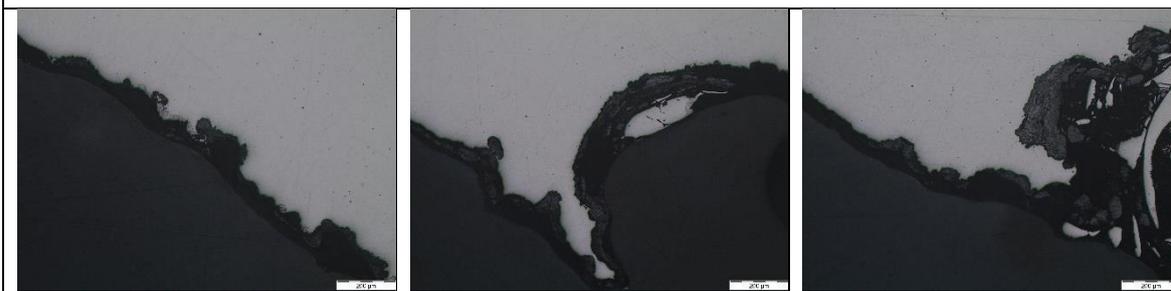
Probeta 20-051-CII-01		
Material Base	ZAC	Material de Aporte
Superior X500 sin ataque químico		
		
Superior X500 con ataque químico		
		
Inferior X500 sin ataque químico		
		
Inferior X500 con ataque químico		

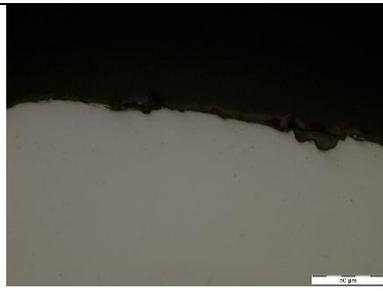
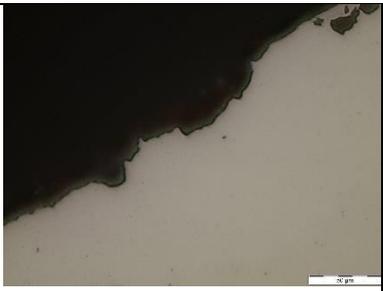
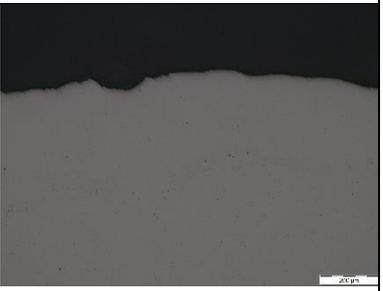


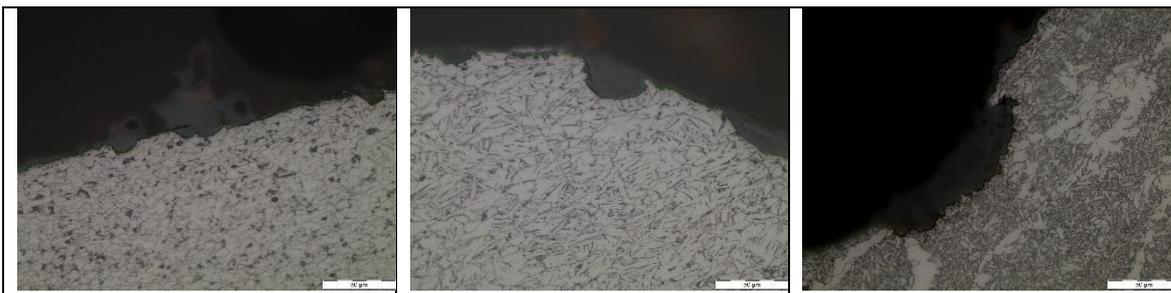
Superior X100 sin ataque químico



Inferior X100 sin ataque químico



Probeta 20-051-CII-02		
Material Base	ZAC	Material de Aporte
Superior X500 sin ataque químico		
		
Superior X500 con ataque químico		



Inferior X50 sin ataque químico



Inferior X50 con ataque químico

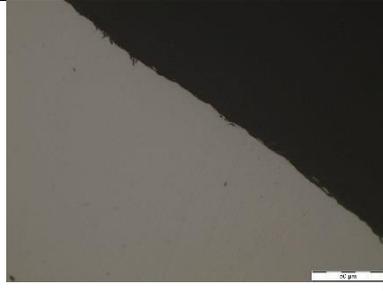
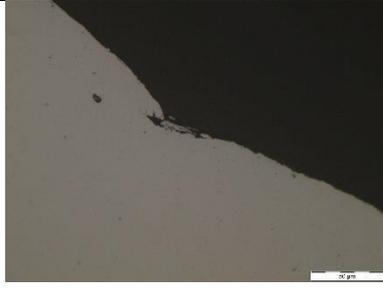
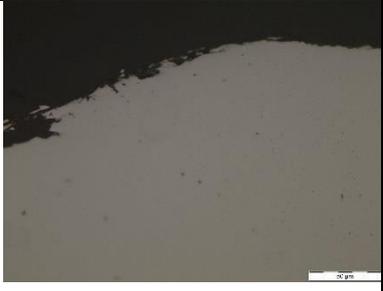
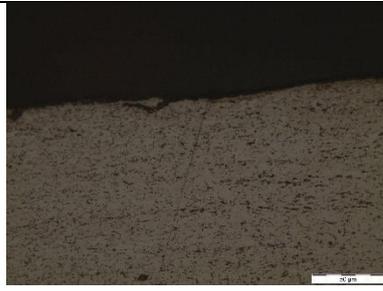
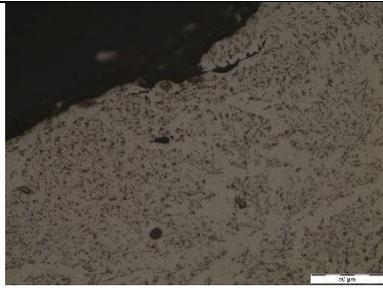
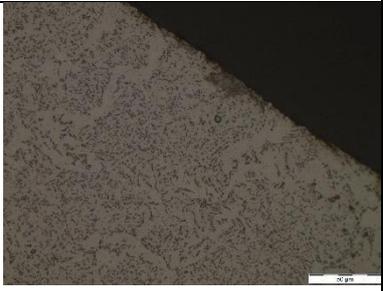
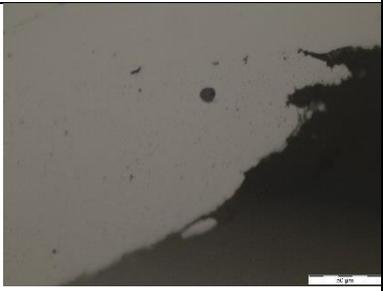
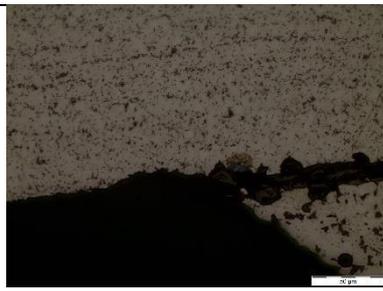
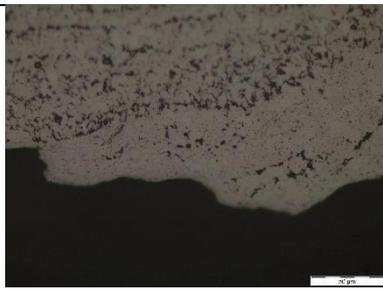
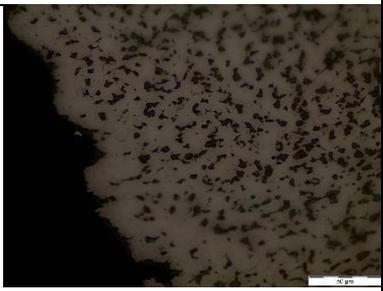


Superior X100 con ataque químico



Inferior X100 con ataque químico



Probeta 20-051-CII-06		
Material Base	ZAC	Material de Aporte
Superior X500 sin ataque químico		
		
Superior X500 con ataque químico		
		
Inferior X500 sin ataque químico		
		
Inferior X500 con ataque químico		
		
Superior X100 con ataque químico		



Inferior X100 con ataque químico

