



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LA SOLDADURA EN UNA TUBERÍA API 5L X52 EXPUESTA EN AMBIENTE SALINO, CON LOS PROCESOS GTAW CON ELECTRODO ER70S-6 Y SMAW CON ELECTRODO E7010

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

GUEVARA RUALES RONNIE JOOB
ronnie.guevara@epn.edu.ec

SANDOVAL PAREDES SANTIAGO DAVID
santiago.sandoval01@epn.edu.ec

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

Quito, agosto 2019

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por los señores **SANTIAGO DAVID SANDOVAL PAREDES** y **RONNIE JOOB GUEVARA RUALES**, bajo mi supervisión.

Ing. Carlos Wime Díaz Campoverde, M- Sc.

DIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Nosotros, **Santiago David Sandoval Paredes y Ronnie Joob Guevara Ruales**, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

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

Santiago David Sandoval Paredes

Ronnie Joob Guevara Ruales

DEDICATORIA

A Jehová;

Por guiarme por las sendas correctas que debo seguir.

A mi padre, Adrián;

*Quien, a pesar de no estar a mi lado, su recuerdo siempre me acompañó en todos mis caminos,
animándome a ser siempre mejor.*

A mi madre, Rosa;

*Por su esfuerzo y lucha para siempre darme lo necesario incluso más, cumpliendo mis gustos y
caprichos, acompañándome día y noche en mis actividades.*

A Bolívar;

*Quien dedicó parte de su vida a cuidarme como si fuera su hijo, y darme un buen reflejo de
paternidad.*

A mi hermana, Ana;

*Quien por su valentía y dedicación me enseñó a sonreírle a la vida y a buscar siempre superarme
en todos mis caminos, ya que ella fue la imagen de mi padre en vida.*

A mi hermana, Gladys;

*Por su apoyo incondicional y el aliento necesario para no descuidar mi espiritualidad,
animándome siempre a buscar las cosas que son más importantes en la vida.*

Santiago D. Sandoval P.

DEDICATORIA

A mi madre, Rosario;

Quien me educó en una base de valores y respeto, apoyándome siempre en mis decisiones y brindando el amor más puro que puede existir; el de una madre a su hijo.

A mi padre, René;

Quien desde pequeño me supo compartir todos sus conocimientos, incitándome en crecer intelectualmente cada vez más.

A mi abuelita, Carmela;

Que, a pesar de no estar aquí presente, siempre supo brindar lo mejor de ella y, sobre todo, por enseñarme de su generosidad.

A mi abuelito, papá Gabei

Quien, desde pequeño, en medio de “fierros”, formó mi vocación.

Ronnie J. Guevara Ruales

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Jehová por ser mi principal fuente de fortaleza y valor en mi vida. A mi madre Rosa, a mis padres Adrián y Bolívar, por cuidarme desde pequeño y dar todo lo posible para que yo pueda tener siempre lo necesario. A mis hermanas Ana y Gladys, por ser pilares fundamentales en mi desarrollo y siempre infundirme valores que me ayudaron en un desarrollo integral. A mis sobrinos Betzabé, Yolanda, Carlos, Wilson, que fueran una ayuda constante en mi desarrollo académico apoyando en todo sentido mis proyectos y mi formación. A mis pequeños sobrinos nietos Daniela, Johana, Karla y Andrés porque siempre han estado pendientes de mi proceso académico y mi salud emocional, a mis primos hermanos Alex y Antonio por haber estado involucrados en mi proyecto de titulación brindando todo su apoyo, a mi tío Ángel por sus consejos y cada integrante de mi familia por siempre apoyarme y ser una guía moral y espiritual en mi vida. También quisiera agradecer a mis amigos Daniel, Carlos y Michelle por siempre estar pendientes de mí en todos los sentidos, fortaleciéndome anímicamente y espiritualmente. A Karo, una persona muy especial que siempre me animó y apoyó en todas mis actividades y por siempre decirme “it is up to you”.

En los últimos años existió una persona que siempre me fortaleció y me ayudó a formar mi carácter y convicción, le agradezco mucho porque de una u otra forma siempre estuvo a mi lado, siendo parte de toda mi vida, gracias Srta. Intriago.

A Ronnie por ser mi compañero en este desafío académico, ser un excelente amigo y ser humano, un respaldo incondicional. A Marco Carrión por su apoyo constante.

En mi desarrollo académico agradezco infinitamente a la Escuela Politécnica Nacional y en especial a la Facultad de Ingeniería Mecánica por haberme brindado una base sólida en los conocimientos de ingeniería y poder desarrollarme profesionalmente.

Agradezco a Verónica Jarrín y a su equipo de trabajo Mayra, Edison, por ser mis tutores incondicionales en la aplicación de mis conocimientos en la vida laboral, y por darme la oportunidad de ser parte de su equipo y vidas.

Agradezco a mi director de tesis Ing. Carlos Díaz, por brindarme todo el apoyo y facilidades para la realización de este trabajo de titulación, y siempre haber sido una persona accesible ante las peticiones realizadas. También al Ing. Gabriel Velastegui, por la colaboración prestada, y la guía incondicional en todo el proceso de titulación. A la Ing. Patricia Proaño y a René Jame por su cortesía y prontitud en los ensayos realizados, al igual que Andrés López, fueron un apoyo constante.

Santiago D. Sandoval P.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme la vida y a la Santísima Virgen de la Caridad, quien día a día me cuida y protege.

A mis padres, Rosario y René; quienes con su amor, confianza, esfuerzo y dedicación me han apoyado emocional y económicamente. Siendo mi ejemplo de vida y enseñándome que nada en esta vida es fácil y todo sacrificio tiene su recompensa. ¡Los amo!

A mis abuelos, Carmela y Gabriel; quienes dedicaron años de su vida en cuidarme, sin escatimar esfuerzos y sobre todo enseñándome sus valores como la generosidad y la confianza. También por enseñarme que la palabra vale más que un papel, gracias por eso abuelito.

A mis demás familiares quienes se han involucrado tanto en mi crecimiento personal como profesional, entre ellos están: Marco Ruales, Bolívar Ibujés, a mi ñaño Adrián y a todos quien me han dado la mano en todo momento.

Agradezco a Santiago, mi compañero de tesis, quien se ha vuelto un hermano para mí y a Marco Carrión, excelente amigo.

Y finalmente expreso un total agradecimiento a la Escuela Politécnica Nacional; alma máter que mediante sus docentes nos han formado profesionalmente. Especialmente al Ing Carlos Díaz por brindar su guía en el desarrollo del presente proyecto, Ing Gabriel Velasteguí por su paciencia y amistad brindada, así como al personal de los laboratorios, entre ellos: Jorge, don René, Andresito, Ing Paty con quienes se ha compartido buenos momentos.

Ronnie J. Guevara Ruales

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	16
Objetivo general	17
Objetivos específicos	17
1. MARCO TEÓRICO	18
1.1 Características de la tubería API 5L.....	18
1.1.1. Proceso de fabricación	18
1.1.2. Requerimientos del material	19
1.1.3. Utilidad de la tubería API 5L	19
1.2. Generalidades de los procesos de soldadura.....	20
1.2.1. Configuración básica y circuito eléctrico de soldadura con arco	20
1.2.2. Nociones de electricidad con relación al arco eléctrico	21
1.2.3. Máquinas de soldar por arco eléctrico	23
1.2.4. Posiciones de las soldaduras	24
1.2.5. Proceso de soldadura GTAW	24
1.2.6. Proceso de soldadura SMAW	26
1.3. Generalidades de la corrosión.....	28
1.3.1. Tipos de corrosión	29
1.3.2. Ensayos de corrosión	32
2. METODOLOGÍA	33
2.1. Caracterización del material base	33
2.1.1. Mecánica	34
2.1.2. Química	35
2.1.3. Metalográfica	37
2.2. Soldadura del material	40
2.2.1. Preparación de probetas para la soldadura	40
2.2.2. Precalentamiento del material base	41

2.2.3.	Equipo de soldadura utilizado	42
2.2.4.	Soldadura GTAW	42
2.2.5.	Soldadura SMAW	43
2.2.6.	Ensayos de soldadura	44
2.3.	Ensayo de corrosión	49
2.3.1.	Características del ambiente de la cámara de salina	50
2.3.2.	Probetas para ensayo de corrosión	50
2.3.3.	Limpieza de probetas	51
2.3.4.	Porta-probetas para ensayo de corrosión	51
2.3.5.	Cargas aplicadas	53
2.3.6.	Distribución de muestras	56
2.3.7.	Posición de las probetas dentro de la cámara de niebla salina	57
2.3.8.	Velocidad de corrosión	58
2.3.9.	Análisis estadístico	58
2.3.10.	Macroscopías.....	59
2.3.11.	Equipo para ensayo de corrosión.....	59
2.3.12.	Procedimiento del ensayo de corrosión.....	61
2.4.	Análisis de probetas corroídas	61
2.4.1.	Análisis metalográfico.....	61
2.4.2.	Ensayo de dureza.....	62
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	65
3.1.	Resultados.....	65
3.1.1.	Caracterización mecánica del material base.....	65
3.1.2.	Caracterización química del material base	65
3.1.3.	Caracterización metalográfica del material base.....	66
3.1.4.	Proceso de soldadura.....	68
3.1.5.	Ensayos mecánicos de soldadura	70
3.1.6.	Ensayo de dureza.....	75

3.1.7.	Ensayo de corrosión	76
3.2.	Discusión	84
3.2.1.	Caracterización mecánica del material base.....	84
3.2.2.	Caracterización química del material base	86
3.2.3.	Caracterización metalográfica del material base.....	87
3.2.4.	Ensayo de soldadura	88
3.2.5.	Ensayo de corrosión	91
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	102
4.1.	Conclusiones	102
4.2.	Recomendaciones	103
	Referencias Bibliográficas	104
	Anexos	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Configuración básica y circuito eléctrico de un proceso de soldadura con arco.	21
Figura 1-2 Configuración polaridad directa.	22
Figura 1-3 Configuración polaridad indirecta.....	22
Figura 1-4 Efecto de la polaridad y del tipo de corriente.	23
Figura 1-5 Soldadura GTAW.....	25
Figura 1-6 Soldadura por arco metálico protegido.	27
Figura 1-7 Tipos de Corrosión.	30
Figura 2-1 Metodología.....	33
Figura 2-2 Probeta para caracterización del material.	34
Figura 2-3 Probeta para caracterización química.....	36
Figura 2-4 Probeta para ensayo metalográfico.	37
Figura 2-5 Probetas preparadas. Superficie A (izquierda), superficie B (derecha).	38
Figura 2-6 Probetas para soldadura.....	41
Figura 2-7 Ubicación de probetas para los diferentes ensayos.	45
Figura 2-8 Probeta para ensayo de tracción.	46
Figura 2-9 Probeta para ensayo de Nick Break.....	47
Figura 2-10 Punzón para ensayo de doblado.	49
Figura 2-11 Probetas para ensayos de corrosión con flexión en tres puntos.	51
Figura 2-12 Diagrama de distribución de cargas.....	52
Figura 2-13 Porta probetas para ensayo de corrosión.	52
Figura 2-14 Probetas colocadas en el porta-probetas.....	53
Figura 2-15 Ángulo de inclinación de las muestras.	57
Figura 2-16 Ubicación del corte realizado	62
Figura 2-17 Probeta para análisis metalográfico.	62
Figura 3-1 Probetas ensayadas a tracción.....	65
Figura 3-2 Valores tomados de la ZAC	70
Figura 3-3 Probetas soldadas ensayadas a tracción.....	71
Figura 3-4 Ensayo de dureza para el proceso de soldadura SMAW (Fuente: Propia).....	76
Figura 3-5 Ensayo de dureza para el proceso de soldadura GTAW.....	76
Figura 3-6 Registro de pérdida de masa.	77
Figura 3-7 Coeficiente entre el peso de las probetas ensayadas en cada semana con respecto al peso inicial.....	78
Figura 3-8 Diferencias de masa por semana (Fuente: Propia).	79

Figura 3-9 Diferencias de masa acumulada.....	80
Figura 3-10 Velocidad de Corrosión vs Tiempo de exposición.....	82
Figura 3-11 Comparación de la resistencia a la tracción del material base (izquierda), comparación del límite de fluencia del material base (derecha), con respecto a la normativa.	85
Figura 3-12 Comparación de la composición química del porcentaje de C (izquierda), porcentaje de Mn (centro) y porcentaje de P (derecha), del material base con respecto a la normativa.....	86
Figura 3-13 Comparación de los resultados del ensayo de tracción de las probetas soldadas con respecto a la norma API 1104.....	89
Figura 3-14 Macrografías probeta 603 antes y después del ensayo de corrosión.....	92
Figura 3-15 Micrografías probeta 692 con ataque de picral al 3%.....	93
Figura 3-16: Micrografía de zonas probeta 692 a 500X con ataque de picral al 3%.....	94
Figura 3-17: Micrografía por zonas probeta 503 a 500X con ataque de picral al 3%.....	95
Figura 3-18 Comparación de la tendencia de la velocidad de corrosión.....	99

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 Procesos de fabricación.....	18
Tabla 1-2 Tipos de aleaciones de electrodos de tungsteno.....	25
Tabla 2-1 Especificaciones: Máquina universal de ensayos.....	35
Tabla 2-2 Especificaciones: Espectrómetro de chispa.	36
Tabla 2-3 Especificaciones: Máquina de desbaste grueso.....	38
Tabla 2-4 Especificaciones: Pulidora semiautomática.....	39
Tabla 2-5 Especificaciones: Microscopio invertido trinocular.....	39
Tabla 2-6 Parámetros de operación de desbaste y pulido.	40
Tabla 2-7 Especificaciones: Equipo de soldadura.....	42
Tabla 2-8 Número de ensayos requeridos según el diámetro de la tubería.....	45
Tabla 2-9 Especificaciones: Máquina para ensayos de doblado guiado	48
Tabla 2-10 Valores del torque aplicado.....	56
Tabla 2-11 Nomenclatura de las probetas corrosión por flexión en tres puntos.	56
Tabla 2-12 Especificaciones: Cámara de niebla salina.	59
Tabla 2-13 Especificaciones: Balanza de precisión.	59
Tabla 2-14 Especificaciones: Torquímetro digital Wrench.....	60
Tabla 2-15 Especificaciones: Macroscopio metalográfico.	60
Tabla 2-16 Especificaciones: Cortadora.....	60
Tabla 2-17 Equipo para ensayo de dureza.	63
Tabla 3-1 Resultados del ensayo de tracción del material base.....	65
Tabla 3-2 Resultados de la caracterización química.	66
Tabla 3-3 Resultados del ensayo metalográfico del material base transversal longitudinal.	66
Tabla 3-4 Resultado de calor de entrada de soldadura.....	69
Tabla 3-5 Valores de la ZAC de probetas testigo.....	70
Tabla 3-6 Resultados del ensayo de tracción en las probetas soldadas.	71
Tabla 3-7 Resultados ensayo de Nick-Break.	72
Tabla 3-8 Resultados del doblado de cara.....	73
Tabla 3-9 Resultados del doblado de raíz.....	74
Tabla 3-10 Medida de dureza en probetas.....	75
Tabla 3-11 Registro de pérdidas de masa.	77
Tabla 3-12 Diferencias de masa por semana.....	78
Tabla 3-13 Velocidades de corrosión.....	81
Tabla 3-14 Resultado del proceso ANOVA.....	84

Tabla 3-15 Comparación del límite de fluencia y resistencia a la tracción con respecto a la normativa API 5L.	85
Tabla 3-16 Comparación de la composición química con respecto a la normativa API 5L.	87
Tabla 3-17 Comparación de la microestructura de la tubería.	87
Tabla 3-18 Comparación de los resultados del ensayo de Nick-Break con respecto a los requerimientos de la norma API 1104.	90
Tabla 3-19 Comparación de los resultados del ensayo de doblado de cara y raíz, con respecto a los requerimientos de la norma API 1104.	90
Tabla 3-20 Aprobación de las soldaduras.	91
Tabla 3-21 Diferencia de espesores.	96
Tabla 3-22 Velocidad de corrosión tubería API 5L X52.	97
Tabla 3-23 Calificación de velocidades de corrosión.	98
Tabla 3-24 Categorización cualitativa de las tasas de corrosión del acero al carbono para los sistemas de producción de petróleo.	98
Tabla 3-25 Velocidades de corrosión menores en cada carga aplicada.	100

RESUMEN

El presente trabajo analiza el comportamiento de dos tipos de soldadura de una tubería API 5L X52, expuesta en un ambiente salino bajo la norma ASTM B117. Las soldaduras aplicadas fueron GTAW con electrodo ER70S-6 y SMAW con electrodo E7010, las cuales se las realizó con y sin precalentamiento en el material base, la calificación de estas se hizo bajo los requerimientos de la norma API 1104. Las probetas extraídas estuvieron sometidas a esfuerzos de flexión y preparadas según las normativas ASTM G1 y ASTM G39, las cargas de flexión aplicadas fueron del 10%, 50% y 80% del límite elástico del material base. El ensayo de corrosión se lo realizó por un periodo de 2016 horas, con inspecciones y toma de datos cada 168 horas. Con los datos obtenidos se calculó la velocidad de corrosión para cada variación de soldadura analizada, esta velocidad se presentó en un rango de $0,68621 \left[\frac{mm}{año} \right]$ a $0,81935 \left[\frac{mm}{año} \right]$. Se comparó las velocidades de corrosión de cada proceso de soldadura mediante un análisis estadístico ANOVA bajo la norma ASTM G16 y un análisis descriptivo, no se obtuvieron mayores significancias al momento de seleccionar un proceso de soldadura que mitigue la corrosión. Al examinar las macrografías se determinó que en todos los procesos el borde del cordón de soldadura que limita con la zona afectada por el calor presenta mayores afectaciones producto de la corrosión. En las micrografías se determinó que el producto de la corrosión de la perlita, actúa como ánodo frente a la ferrita que posee un comportamiento catódico en el proceso de corrosión existente, por lo cual, en la ZAC al existir mayor dispersión de perlita en una matriz ferrítica, se presencia mayor corrosión.

Palabras clave: API 5L X52, corrosión, normativa, soldadura, ZAC.

ABSTRACT

This project analyzes the behavior of two type of welds on an API 5L X52 pipeline, that was exposed to a saline environment under the ASTM B117 standard. The applied welds were GTAW with ER70S-6 electrode and SMAW with E7010 electrode, which were made with and without preheating the base material, the qualification of these was done by the API 1104 requirements. The extracted specimens were submitted to flexion effort and prepared according to ASTM G1 and ASTM G39 standard, the applied flexion loads were 10%, 50% and 80% of the base material elastic limit. The corrosion essay was performed on a 2016 hours period, with inspections and data collection each 168 hours. The corrosion rate for every analyzed weld variation was calculated with the obtained data in the experimental process. The rate was presented in a range from $0,68621 \left[\frac{mm}{año} \right]$ to $0,81935 \left[\frac{mm}{año} \right]$. The corrosion rate from each welding process was compared by an ANOVA statistical analysis under the ASTM G16 standard and a descriptive analysis, the results did not present greater differences, therefore, we could not choose one weld process that mitigates the corrosive process. When examining the macrographs, it was determined that on every process the edge of weld that limits with the heat-affect zone presents more affectations as result of the corrosion. In the micrographs, it was determined that the corrosion product of the pearlite acts as an anode in front of the ferrite that has a cathodic behavior in the corrosion process, for this reason, more corrosion is evident in the HAZ, due to it is higher pearlite dispersion on the ferritic matrix.

Keywords: API 5L X52, corrosion, standard, weld.

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LA SOLDADURA EN UNA TUBERÍA API 5L X52 EXPUESTA EN AMBIENTE SALINO, CON LOS PROCESOS GTAW CON ELECTRODO ER70S-6 Y SMAW CON ELECTRODO E7010.

INTRODUCCIÓN

En el Ecuador la industria petrolera es una de las más grandes del país teniendo mucha influencia en el sector económico. Por esta razón se debe garantizar todos los procesos de perforación, extracción y transporte del oleoducto. Asegurando la conservación de la flora y fauna de los sectores involucrados.

Para todos los procesos del campo petrolero uno de los materiales fundamentales es la tubería, especialmente la de denominación API 5L X52, ya que puede ser usada para perforación, extracción y transporte del petróleo.

En esta tubería el proceso común de soldadura para la unión de juntas es SMAW con electrodo E7010 y es instalada en su mayoría en la región amazónica del Ecuador, donde su ambiente se caracteriza por la alta humedad, haciendo que la velocidad de corrosión aumente significativamente desde la parte interna de la tubería hasta su parte externa deteriorándose en gran medida la zona afectada por el calor. Daños que implican pérdidas económicas, tiempo de producción, pérdidas materiales y en casos más drásticos derrames de crudo.

Debido a la importancia de esta tubería, se considera realizar el estudio del comportamiento de la soldadura en una tubería API 5L X52 expuesta en ambiente salino, con los procesos GTAW con electrodo ER70S-6 y SMAW con electrodo E7010; con el fin de determinar cuál de los dos procesos de soldadura mitiga la corrosión en esta tubería.

Objetivo general

Estudiar el comportamiento de la soldadura en una tubería API 5L X52 expuesta en ambiente salino, con los procesos GTAW con electrodo ER70S-6 y SMAW con electrodo E7010

Objetivos específicos

- Caracterizar la tubería API 5L X52 mediante ensayos químicos, metalográficos y mecánicos.
- Someter a las juntas soldadas a un ambiente corrosivo, en una cámara salina bajo la norma ASTM B117.
- Realizar ensayos de corrosión a flexión a las juntas soldadas.
- Registrar y analizar las juntas soldadas corroídas, comparar los resultados para determinar el proceso que mitiga de mejor forma la corrosión.

1. MARCO TEÓRICO

Esta sección se centra en la información y conceptos básicos para el análisis de corrosión en una tubería API 5L, tras un proceso de soldadura GTAW y SMAW frente a un medio corrosivo.

1.1 Características de la tubería API 5L

La normativa API 5L presenta estándares para tuberías las cuales tienen aplicaciones en el transporte de gas, agua y petróleo, esta contempla diversos grados de acero al carbono que están estandarizados: Grados A25, A, B, X42, X 46, X52, X56, X60, X65, X70 y X80. Estos tienen dos niveles de especificaciones del producto (PSL1 y PSL2), los cuales definen dos diferentes categorías de requisitos dentro de la normativa. En el Anexo I, se presenta un resumen de las diferencias entre PSL1 y PSL2 II (API, 2004).

1.1.1. Proceso de fabricación

La tubería, según esta especificación, debe ser fabricada sin costura o soldada, y limitada para los grados; tipos y diámetro mínimo según lo indica la Tabla 1-1.

Tabla 1-1 Procesos de fabricación.

Tipo de tubería	Grado	
	A25	Hasta X80
Sin costura	X	X
Soldadura continua	X	
Soldada eléctricamente	X	X
Soldada longitudinalmente por arco sumergido		X
Soldada por gas arco metálico ^a		X
Soldada por combinación de arco sumergido ^a y gas arco metálico		X
Soldada por arco sumergido doble cordón ^a		X
Soldada por gas arco metálico doble cordón		X
Soldada por combinación de arco sumergido y gas arco metálico doble cordón ^a		X
Soldada helicoidalmente por arco sumergido ^b		X
Notas:		
a) La tubería doble cordón está limitada a tamaños 36 pulgadas y mayores.		
b) La tubería con costura helicoidal está limitada a tamaños 4 1/2 y mayores.		

(Fuente: API 5L, 2004).

1.1.2. Requerimientos del material

Toda tubería API 5L debe estar dentro de los límites de composición química y propiedades mecánicas con respecto a la norma “API 5L: Specification for Line Pipe”.

1.1.2.1. Propiedades químicas

La composición del acero utilizado para la fabricación de la tubería debe cumplir con los requisitos químicos que se establecen para los niveles PSL 1 y PSL2. La composición de grados intermedios y superiores a X42 deben cumplir con los requerimientos químicos de la siguiente calidad estándar más alta. Para grados X42 y superiores, bajo común acuerdo entre el comprador y el fabricante, se pueden usar otros elementos aleantes especificados en la norma. Sin embargo, se debe tener cuidado al determinar el contenido de tales elementos deseables ya que puede afectar la soldabilidad de la tubería. En el Anexo I, se presentan los requerimientos químicos para tubería PSL 1 y PSL 2, respectivamente.

1.1.2.2. Propiedades mecánicas

Según la normativa API 5L, 2014, las propiedades mecánicas se las puede caracterizar con pruebas de tracción, estas deben ser realizadas mediante probetas con diversas orientaciones las cuales se presenta en el Anexo II, la orientación de la prueba de tracción debe ser en la dirección longitudinal para todos los tamaños de tubería sin soldadura tratada o trabajada en caliente y toda tubería soldada de una dimensión inferior a 219 mm. Para tuberías soldadas y tuberías sin soldadura de tamaño 219 mm. y mayores, la orientación de la prueba de tracción debe ser en la dirección transversal. Para las probetas, el ancho especificado en la longitud del calibre debe ser de 38,1 mm. o 19,0 mm. para tuberías de tamaño 88,9 mm. o menores; ya sea 38,1 mm. o 25,4 mm. para tubos de mayor tamaño que 88,9 mm. hasta tamaño 168,2 mm., inclusive; y 38,1 mm. para tubos de mayor tamaño 168,2 mm. Las características de una probeta, con orientación longitudinal para este ensayo se muestran en el Anexo II.

Las propiedades encontradas en el ensayo de tracción deben cumplir con los requisitos que establece la norma API 5L para PSL1 y PSL2, tales valores se encuentran en el Anexo I.

1.1.3. Utilidad de la tubería API 5L

La tubería con especificación API 5L del Instituto Americano de Petróleo se utiliza principalmente para el transporte de gas natural y petróleo. Sin embargo, tiene otras aplicaciones como en: plantas de energía, calderas, alimentos, tratamiento de aguas

residuales, plantas petroquímicas y buques donde la tubería debe transportar líquidos y gases que presentan altas presiones y temperaturas. Estas tuberías API 5L son sin costura y soldadas. Un tubo API 5L se fabrica siguiendo las especificaciones establecidas por la Organización Internacional de Normalización y por sus siglas en inglés ISO en su normativa 3183.

1.2. Generalidades de los procesos de soldadura

La soldabilidad de un metal se define como su capacidad para ser soldado en una estructura específica que tiene ciertas propiedades y características, cumpliendo en forma satisfactoria con los requerimientos del servicio. Hay que tener en cuenta que no todos los materiales tienen la misma soldabilidad, y esta varía según el proceso de soldadura, las propiedades del metal base, el metal de relleno y las condiciones de la superficie. En el caso de los aceros, la soldabilidad disminuye al aumentar el contenido de carbono, debido a la formación de martensita. La martensita es dura y frágil, y su formación procede con un incremento de volumen que impone esfuerzos adicionales en la estructura. La tubería API 5L X52 PSL1 tiene como porcentaje de carbono máximo de 0,28% por lo cual según la propiedad del metal base, esta tubería tiene buena soldabilidad y se utilizan procesos de soldadura con arco.

1.2.1. Configuración básica y circuito eléctrico de soldadura con arco

La configuración básica y circuito eléctrico de un proceso de soldadura con arco consta de una fuente de alimentación, un soporte de electrodo, cable del electrodo y cable de masa (trabajo) y pieza de masa (sujetador), como se muestra en la Figura 1-1. Para iniciar el arco en el proceso, se acerca el electrodo a la pieza de trabajo generando un circuito cerrado momentáneo; después del contacto, el electrodo se separa rápidamente de la pieza a una distancia corta. La energía eléctrica del arco formado genera temperaturas de 5500 °C o mayores, esta temperatura es más que necesaria para fundir cualquier metal. Se forma un pozo de metal fundido, que consiste del metal base y el material de aporte, cerca de la punta del electrodo. Conforme el arco avanza por el movimiento del electrodo a lo largo de la unión, el pozo de metal fundido se solidifica de inmediato.

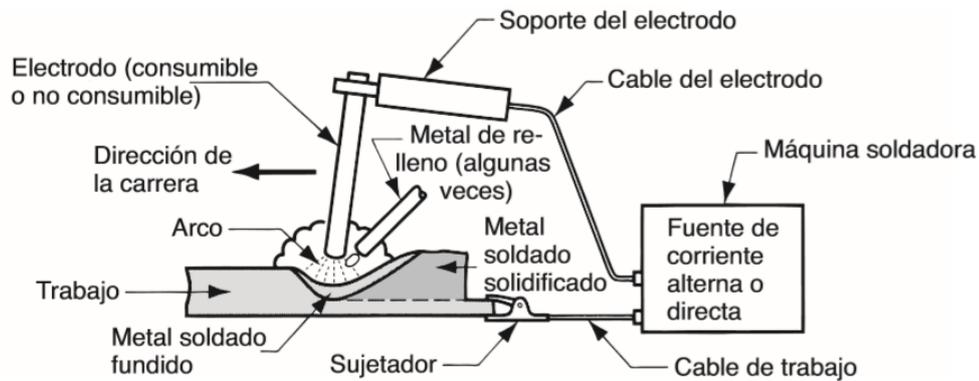


Figura 1-1 Configuración básica y circuito eléctrico de un proceso de soldadura con arco.

(Fuente: Mikell P. Groover, 2007).

1.2.2. Nociones de electricidad con relación al arco eléctrico

Para generar un arco eléctrico correcto se necesita aplicar diferentes fundamentos relacionados con la electricidad.

1.2.2.1. Voltaje, amperaje y potencia

La corriente eléctrica fluye a través de un circuito, impulsado por un flujo de electrones dentro de un conductor. Este impulso, que induce una corriente eléctrica, se llama diferencia de potencial, tensión o voltaje. El voltaje se expresa en voltios (V), y se mide con el voltímetro. La cantidad de electricidad por segundo que pasa por un conductor, se llama corriente eléctrica la cual se expresa en Amperios (A), y se mide con la utilización de un amperímetro. Todas las máquinas de soldar cuentan con reguladores, que permiten variar el amperaje o intensidad de corriente eléctrica necesaria para soldar. La potencia medida en vatios (W), se calcula multiplicando el voltaje (V) con el amperaje (A). Mide la cantidad de energía eléctrica o potencia en el arco.

El voltaje controla la abertura máxima que los electrones pueden saltar para formar el arco, a mayor voltaje la abertura puede ser mayor. Con el control del amperaje se puede regular el tamaño del arco eléctrico. La cantidad de vatios por unidad de longitud que se ponen en una soldadura controla el ancho y la profundidad del cordón de soldadura.

1.2.2.2. Clases de corriente eléctrica

Corriente alterna (AC). - El flujo de corriente presenta variaciones de una dirección positiva a su dirección opuesta negativa. El tiempo comprendido entre los cambios de dirección positiva y negativa se conoce como ciclo o periodo.

Corriente continua (CC). - El flujo de corriente conserva siempre una misma dirección.

1.2.2.3. Polaridad

En la corriente continua es importante saber la dirección del flujo de corriente. En un circuito de soldadura la dirección del flujo de corriente se denomina polaridad.

Si el cable del soporte del electrodo es conectado al polo negativo (-) de la fuente de poder y el cable de tierra al polo positivo (+), el circuito es denominado polaridad directa o normal, la configuración está representada en la Figura 1-2.

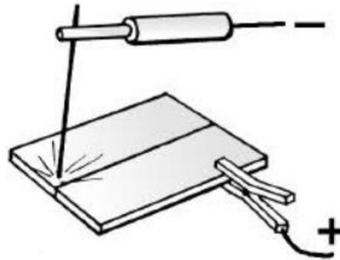


Figura 1-2 Configuración polaridad directa.

(Fuente: <http://cursosdelmetal.blogspot.com/2013/04/concepto-basico.html>).

Cuando el cable del soporte del electrodo es conectado al polo positivo (+) de la fuente de poder y el cable de tierra al polo negativo, el circuito es denominado polaridad invertida o indirecta, la configuración está representada en la Figura 1-3.

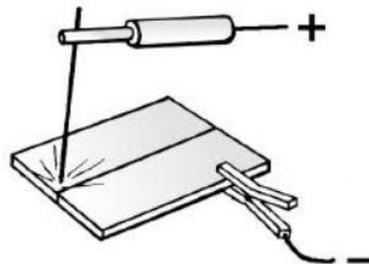


Figura 1-3 Configuración polaridad indirecta.

(Fuente: <http://cursosdelmetal.blogspot.com/2013/04/concepto-basico.html>).

Generalmente, el electrodo conectado en polaridad inversa (polo positivo) permite una mayor penetración y el electrodo conectado en polaridad directa (polo negativo) da una mayor velocidad de fusión, en la Figura 1-4 se muestra la afectación al cordón según el tipo de corriente a utilizar. Sin embargo, los componentes químicos del revestimiento del electrodo o el gas a usarse en la soldadura pueden hacer variar los efectos de la polaridad y, por ello, es conveniente seguir las instrucciones del fabricante al momento de conectar el electrodo, ya sea al polo positivo o negativo.

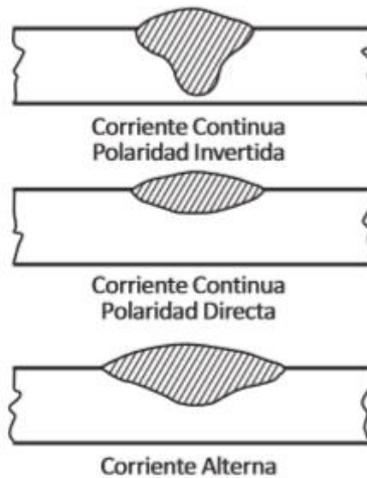


Figura 1-4 Efecto de la polaridad y del tipo de corriente.

(Fuente: Soldexa, 2016).

Al usar electrodo en la soldadura, debe utilizarse siempre la polaridad correcta para obtener resultados satisfactorios: buena penetración, aspecto uniforme del cordón, excelente resistencia de la junta soldada.

1.2.3. Máquinas de soldar por arco eléctrico

Las máquinas de soldadura deben permitir una conversión automática e instantánea del voltaje en vacío a un voltaje de trabajo, que permita mantener el arco. También la regulación de la intensidad de corriente necesaria para soldar y la alimentación constante de la misma; esta intensidad varía según el diámetro, espesor de la pieza, posición del trabajo, diámetro del electrodo, entre otros factores que deben ser considerados.

Las máquinas de soldar se pueden clasificar con diferentes criterios, uno de estos separa a las máquinas considerando si poseen o no un movimiento continuo:

Máquinas estáticas.

- Transformadores.
- Rectificadores.
- Transformadores- Rectificadores.

Máquinas rotativas (convertidores).

- De motor eléctrico.
- De motor a combustión interna.

1.2.3.1. Máquinas estáticas

Las máquinas estáticas son las que no poseen elementos de movimiento continuo, existen los siguientes tipos:

- Máquinas tipo transformador. – Proporcionan corriente alterna para soldar.
- Máquinas tipo rectificador. – Son máquinas que mediante rectificadores transforman la corriente alterna a corriente continua para soldar.
- Equipos transformador-rectificador. – Este equipo facilita tanto corriente continua como alterna para soldar. Según el requerimiento este equipo puede tomar la función de transformador o rectificador.

1.2.3.2. Máquinas rotativas

Las máquinas rotativas (convertidores) las cuales poseen elementos de rotación constante; están compuestas de un motor que mediante un dínamo produce la corriente eléctrica apropiada para soldar, el motor puede ser:

- Eléctrico, funcionando con la corriente eléctrica proveniente de una red de alimentación.
- De combustión, utilizando gasolina o diésel.

En el caso de las motosoldadoras son máquinas utilizadas para trabajos en campo donde no existe una red general de electricidad.

1.2.4. Posiciones de las soldaduras

Todas las soldaduras deben clasificarse como: planas (F), horizontales (H), verticales (V) y de sobre cabeza (OH); en conformidad con las definiciones que se muestra en el Anexo III.

1.2.5. Proceso de soldadura GTAW

La soldadura con arco de tungsteno y gas, por sus siglas en inglés GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), es un proceso que usa un electrodo no consumible de tungsteno, por su alto punto de fusión de 3410 °C, y un gas inerte para proteger el arco, generalmente es helio o argón, o una mezcla de los dos. El metal de aporte es suministrado por un alambre de aporte el cual es seleccionado de acuerdo al metal a soldar, existen soldaduras en las cuales no se requiere un material de aporte. El proceso se ilustra en la Figura 1-5. La fusión para la soldadura es producida por el calor de un arco que se genera entre el electrodo de tungsteno no-consumible y la pieza de trabajo, debido a que en esta operación no se consume el electrodo de tungsteno, se mantiene una abertura de arco constante y estable en un nivel constante de corriente. El proceso

es envuelto por un gas protector y la varilla desnuda de metal de aporte es aplicada manualmente, introduciéndola en el arco y en el baño de fusión.

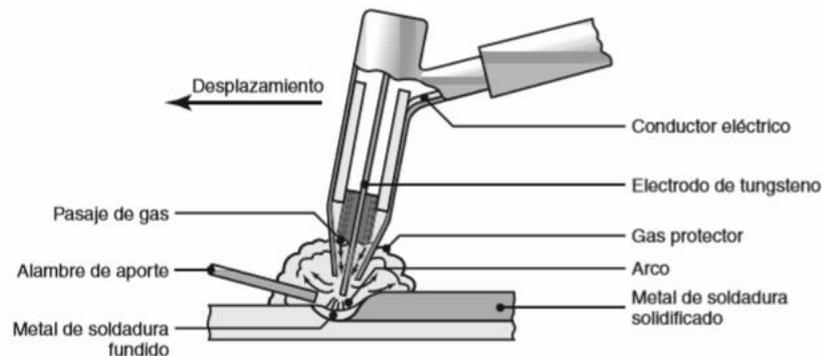


Figura 1-5 Soldadura GTAW.

(Fuente: Kalpakijan, S. & Schmid, S. R.,2008).

1.2.5.1. Electrodo

Para este tipo de soldadura se utiliza un electrodo no consumible de tungsteno debido a su alto punto de fusión (3410 °C), existen diferentes tipos de aleaciones las cuales ayudan a optimizar el encendido del arco, estabilizar el arco y disminuye la erosión de la punta.

Según la AWS A5.12, en la Tabla 1-2 se presentan los tipos de aleación de electrodos de tungsteno:

Tabla 1-2 Tipos de aleaciones de electrodos de tungsteno.

Aleación	AWS	ISO	Cantidad de oxido
2% Torio	EWTh-2	WT20	1,7-2,2% ThO ₂
2% Cerio	EWCe-2	WC20	1,8-2,2% CeO ₂
1,5% Lantano	EWLa-1,5	WL20	1,3-1,7% La ₂ O ₃
1% Lantano	EWLa-1	WL10	0,8-1,2% La ₂ O ₃
Zirconio	EWZr-1	WZ3	0,15-0,40% ZrO ₂
Puro	EWP	W	Ninguno

(Fuente: Propia).

1.2.5.2. Material de aporte

Dentro del proceso GTAW se utiliza como material de aporte varillas de soldadura. Estas tienen la misma característica que el núcleo del electrodo, pero sin revestimiento, es decir, son totalmente desnudas. Estas varillas deben ser de igual o mejor calidad que el material a soldar.

1.2.5.2.1 Nomenclatura de la varilla para soldar

Según la AWS A5.18, todas las varillas para soldar deben ser identificados de la siguiente manera:

$$ER\ XX - SY$$

Donde:

E Indica electrodo para soldadura por arco.

R Indica aporte que funde por un medio diferente que el que conduce la corriente del arco eléctrico (sólo caso TIG y plasma).

XX Indica la resistencia a la tracción nominal del depósito de soldadura (igual para todos los casos).

S Indica que el electrodo es sólido.

Y El último número que indica la composición química del electrodo.

1.2.5.3. Características de la varilla para soldar ER70S-6

El alambre ER70S-6, es un alambre cobreado recomendado para la soldadura en aceros al carbono, puede ser utilizado en todas las posiciones de soldadura. Su contenido de Mn y Si controlado le confieren una mayor limpieza en el depósito. En el Anexo IV se presentan las características del electrodo dadas por el fabricante con las recomendaciones de uso.

1.2.5.4. Gases de protección

Al proceso de soldadura GTAW también se lo conoce como TIG (Tungsten Inert Gas) porque utiliza un gas inerte como protección del arco generado contra la contaminación atmosférica.

El gas de protección más empleado es el Argón, sin embargo, se puede emplear Helio o mezclas de Argón/Helio o Argón/Hidrógeno, esta selección depende de las características del material a soldar.

1.2.6. Proceso de soldadura SMAW

La soldadura con arco de metal protegido, por sus siglas en inglés SMAW (Shield Metal Arc Welding), es un proceso de soldadura que usa un electrodo consumible y consiste en una varilla de metal de relleno recubierta con materiales químicos que proporcionan un fundente y protección. El proceso se ilustra en la Figura 1-6. El metal de relleno usado en la varilla debe ser compatible con el metal que se va a soldar y, por lo tanto, la

composición debe ser muy parecida a la del metal base. El recubrimiento consiste en celulosa pulverizada (por ejemplo, polvos de algodón y madera) mezclados con óxidos, carbonatos y otros ingredientes integrados mediante un aglutinante de silicato. Algunas veces se incluyen en el recubrimiento polvos metálicos para aumentar la cantidad de metal de relleno y agregar elementos aleantes. El calor del proceso de soldadura, generado por el arco eléctrico, funde el recubrimiento y proporciona una atmósfera protectora y escoria para la operación de soldadura. También ayuda a estabilizar el arco y regula la velocidad a la que se funde el electrodo.

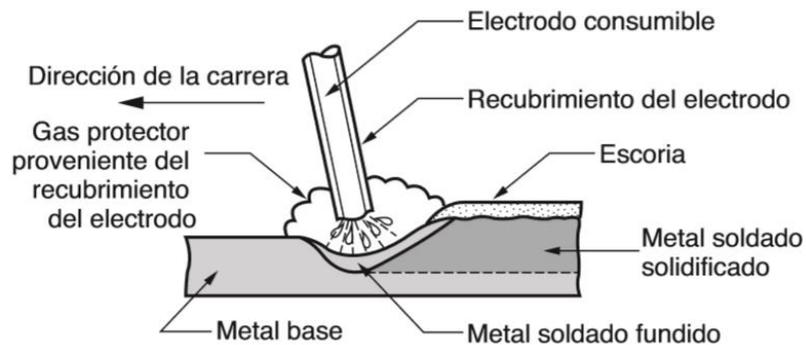


Figura 1-6 Soldadura por arco metálico protegido.

(Fuente: Mikell P. Groover, 2007).

1.2.6.1. Material de aporte para proceso SMAW

En el proceso de soldadura SMAW se utilizan electrodos revestidos, según el material del cual están constituidos se clasifican en:

Según su núcleo:

- Electrodos para aceros al carbón (bajo y alto)
- Electrodos para aceros inoxidables o de aleación especial
- Electrodos para hierro fundido
- Electrodos para metales no ferrosos (aluminio, bronce, etc.)

Según su revestimiento:

- Celulósico. – Lleva este nombre por el alto contenido de celulosa en el revestimiento, sus principales características son: máxima penetración, solidificación rápida, buenas características de resistencia, elasticidad y ductilidad.
- Rutílico. – Lleva este nombre por el alto contenido de rutilo (óxido de titanio), sus principales características son: mediana penetración, arco suave.
- Básico o de bajo hidrogeno. – Lleva este nombre debido a que su revestimiento tiene la ausencia absoluta de humedad (hidrogeno), sus características principales son: mediana a alta penetración, máxima resistencia en los depósitos, alta ductilidad, alta resistencia a los impactos a baja temperatura.

- Hierro en polvo. – Pertenecen los electrodos que contienen una cantidad de hierro en polvo, sus principales características son: alta penetración, relleno rápido, suaviza la energía del arco.

1.2.6.1.1 Nomenclatura del electrodo

Según la AWS A5.5, todos los electros deben ser identificados de la siguiente manera:

$$E\ XX\ YY - Z$$

Donde:

E Indica electrodo para soldadura por arco.

XX Indica la resistencia a la tracción mínima en Ksi, o Mpa dividido para 10.

YY Indica la posición de soldadura en la cual los electrodos son utilizables, el tipo de revestimiento, y el tipo de corriente para la que los electrodos son apropiados.

Z Indica la composición química del metal de soldadura no diluido producido por el electrodo utilizando soldadura por arco metálico.

1.2.6.2. Características del electrodo E7010

El electrodo AWS A5.5/ ASME-SFA 5.5 E7010 es un electrodo con alto contenido de celulosa, que es utilizado comúnmente para soldar líneas de tuberías. Este electrodo puede ser utilizado en todas las posiciones de soldadura. En el Anexo IV se presentan las características del electrodo dadas por el fabricante con las recomendaciones de uso.

1.3. Generalidades de la corrosión

La corrosión es el ataque destructivo de un metal por reacción química o electroquímica con su medio ambiente, que produce pérdida de las propiedades específicas del material. Esto se produce debido a que los metales tienden a estabilizarse, es decir, volver a su estado natural de forma oxidada y una manera de hacerlo es a través de la corrosión (ASM, 2003).

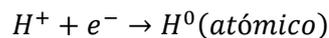
La corrosión por reacción química directa se produce en condiciones extremas que comprenden medios altamente corrosivos, elevadas temperaturas o una combinación de ambas, siendo estas condiciones no comunes en la naturaleza. Por lo cual, los fenómenos corrosivos en su mayoría son electroquímicos.

El mecanismo electroquímico se lo puede explicar con el funcionamiento de una celda electroquímica, constituida por tres elementos: unos electrodos (un ánodo y un cátodo), un electrolito, como medio conductor, que en la mayoría de los casos corresponde a una solución acuosa, y una conexión eléctrica entre los electrodos (ECCA, 2011). El efecto se produce debido a las reacciones que existen entre un ánodo y un cátodo.

- Reacción anódica. – Son los tipos de reacción resultantes de una oxidación química, en la cual se disuelve el metal en el electrolito en forma de iones cargados positivamente.



- Reacción catódica. – Son los tipos de reacción resultantes de una reducción química. En la cual se genera una capa de hidrógeno atómico en la superficie catódica formado por iones cargados positivamente. Se produce una neutralización de iones de hidrógeno equivalente a los electrones liberados por la reacción anódica que llegan hasta el cátodo por un medio conductor.



Estas dos reacciones se acoplan perfectamente debido a que las especies oxidadas proporcionan los electrones necesarios para las especies reducidas. La reacción que se genera en el ánodo produce en este la corrosión.

Tomando en cuenta la teoría electroquímica de la corrosión, definimos a la corrosión como una red de pilas galvánicas en corto circuito sobre la superficie de los metales.

1.3.1. Tipos de corrosión

Existen diferentes procesos de corrosión que varían dependiendo de la naturaleza del material, su utilidad y las condiciones del medio ambiente. Se los puede clasificar en las siguientes categorías (Figura 1-17):

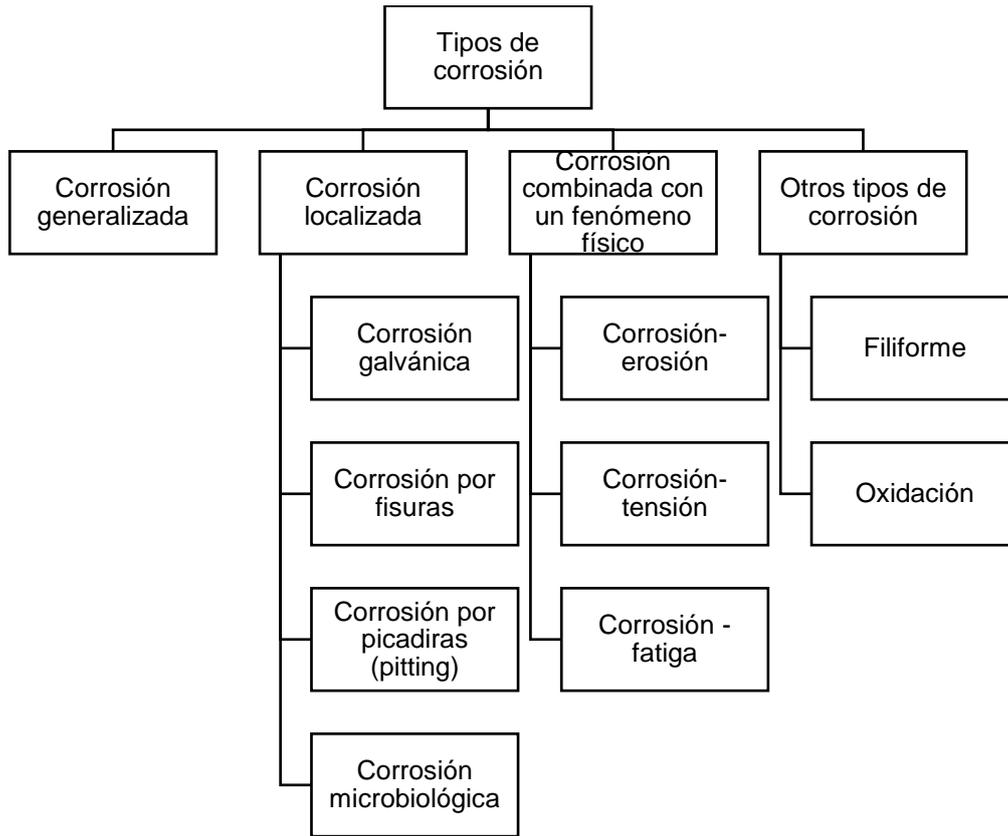


Figura 1-7 Tipos de Corrosión.

(Fuente: Propia).

1.3.1.1. Corrosión generalizada

La corrosión generalizada, también llamada corrosión uniforme, es el deterioro superficial homogéneo del metal provocando una reducción de espesor del mismo. La velocidad de corrosión para estos casos, está relacionada con la presencia de impurezas y fases distintas en el material, también del tipo de atmosfera en la que esté presente ya que existe una diferenciación de sales, compuestos de sulfuro y otros contaminantes atmosféricos.

1.3.1.2. Corrosión localizada

La corrosión localizada es el tipo de corrosión manifestada en zonas específicas de un material, lo cual es de gran riesgo en la industria por su difícil detectabilidad. Se genera debido a la naturaleza del material, su geometría, condiciones del medio al que se somete, entre otros factores. Los procesos de corrosión localizada que generalmente se encuentran son: galvánica, por fisuras, por picaduras, por cavitación y microbiología.

- Corrosión galvánica. – Este tipo de corrosión ocurre cuando existe una unión, física o eléctrica, entre metales de diferente naturaleza, y con la presencia de un electrolito, forman una celda electroquímica, donde el material de menor potencial electroquímico es el que se corroe (Revie, 2011).
- Corrosión por fisuras. - Este tipo de corrosión se asemeja a una corrosión galvánica, pero se produce en estrechas zonas en las cuales la concentración de oxígeno es menor que el resto del material, haciendo que esta zona actúe como un ánodo, iniciando el proceso de corrosión, en las fisuras.
- Corrosión por picaduras. - También conocido como pitting se presenta en materiales pasivados, que debido a su geometría tiende a concentrar agentes oxidantes e incrementar el Ph del medio, generando un deterioro de la capa pasivada, permitiendo que la corrosión se desarrolle en zonas puntuales.
- Corrosión por cavitación. – Este tipo de corrosión ocurre en sistemas hechos de materiales pasivados, utilizados para el transporte de sustancias líquidas. En estos sistemas existen cambios de presión, produciendo flujos turbulentos que forman burbujas de aire, las cuales implosionan contra el material del sistema, deteriorando la capa de pasivación, facilitando el proceso de corrosión, de manera similar que la corrosión por pitting, cuya diferencia se observa, en que el efecto de la cavitación es de mayor tamaño.
- Corrosión microbiológica. – Es un fenómeno que contribuye al desarrollo de otros tipos de corrosión. Al ser las bacterias los microorganismos más influyentes, también es conocido como corrosión bacteriana y se produce en sistemas de transporte de sustancias líquidas, facilitando la corrosión por picaduras. La naturaleza de la sustancia líquida que es transportada propicia la acumulación y reproducción de bacterias, las cuales se aglomeran causando una variación de concentración de sales y oxígeno, para que se desarrolle otros tipos de corrosión como el pitting.

1.3.1.3. Corrosión combinada con un fenómeno físico

Este tipo de corrosión se la puede considerar como corrosión localizada, sin embargo, se diferencia ya que está condicionada por la presencia de un fenómeno físico, que es un indicador del proceso de corrosión.

- Corrosión- erosión. – Este tipo de corrosión está comúnmente presente en sistemas de transporte de sustancias líquidas hechas de materiales pasivados, donde existe la presencia de partículas con mayor dureza a la capa de pasivación, al estar estas partículas en movimiento erosionan la capa pasivada, permitiendo el desarrollo del proceso de corrosión.
- Corrosión- tensión. – Este tipo de corrosión se produce cuando un material está sometido a esfuerzos de tensión, ya sean internos o externos, formando pequeñas fisuras que dan inicio al proceso de corrosión. Este tipo de corrosión es muy perjudicial ya que la corrosión debilita al material, lo cual permite que la tensión tenga mayor influencia, agrietando al material en mayor medida, lo cual a su vez da paso a que la corrosión se propague en un área mayor, y así, sucesivamente.

- Corrosión- fatiga. - Este tipo de corrosión se produce cuando un material está sometido a esfuerzos cíclicos o fluctuantes, ya sean internos o externos, teniendo el mismo efecto que en el proceso de tensión.

1.3.2. Ensayos de corrosión

Los ensayos de corrosión son útiles ya que ayudan con el desarrollo de nuevos materiales y recubrimientos, la elección de esquemas de protección en equipos nuevos o antiguos, y la selección de procesos con diferentes variables que mitiguen la corrosión. Los métodos de prueba para determinar la resistencia a la corrosión son específicos y deben basarse en las condiciones reales de servicio del material a ensayar.

La Sociedad Americana para Pruebas y Materiales o por sus siglas en inglés ASTM, presenta diversos métodos de ensayos de corrosión con sus respectivos estándares. El tipo de método a escoger dependerá del material a ensayar y el propósito que tenga el ensayo a realizarse. Entre estos ensayos está el ensayo de corrosión por tensión.

1.3.2.1. Ensayo de corrosión por tensión

Según la ASTM en su publicación STP 425, publicada en el 2014, el ensayo de corrosión por tensión se lleva a cabo por diversas razones, tales como:

- Evaluar un metal o aleación, o varios tratamientos térmicos de una aleación para la susceptibilidad a la corrosión por tensión en ciertos entornos.
- Comparar las susceptibilidades a la corrosión por tensión de varias aleaciones.
- Evaluar entornos que puedan acelerar el agrietamiento por corrosión bajo tensión en varias aleaciones.
- Evaluar un requisito de servicio específico con respecto a la posibilidad de corrosión por tensión.
- Evaluar la efectividad de los recubrimientos u otras medidas de protección para reducir la corrosión por tensión de metales y aleaciones susceptibles.

Según la norma ASTM G39- 99 (Standard Practice for Preparation and Use of Bent-Bean Stress-Corrosion Test Specimens), el proceso de corrosión bajo tensión es un proceso de agrietamiento (craqueo) que requiere la acción simultanea de un corrosivo y un esfuerzo de tracción constante que este por debajo del límite elástico. Este ensayo empieza cuando a las probetas se les aplica un esfuerzo constante, utilizando diferentes mecanismos y exponiéndolos a un ambiente corrosivo.

Se considera que las muestras han fallado cuando se detectan grietas. La presencia de estas se puede determinar con o sin ayudas ópticas, mecánicas o electrónicas. Sin embargo, para una interpretación apropiada deben hacerse solo comparaciones entre pruebas que utilizan métodos de detección de grietas con la misma sensibilidad.

2. METODOLOGÍA

El presente trabajo de investigación tiene como finalidad estudiar el comportamiento de la soldadura en una tubería API 5L X52 expuesta en ambiente salino, con los procesos GTAW con electrodo ER70S-6 y SMAW con electrodo E7010. Por lo cual se consideró la realización de los siguientes procesos mostrados en la Figura 2-1 para alcanzar los objetivos deseados.

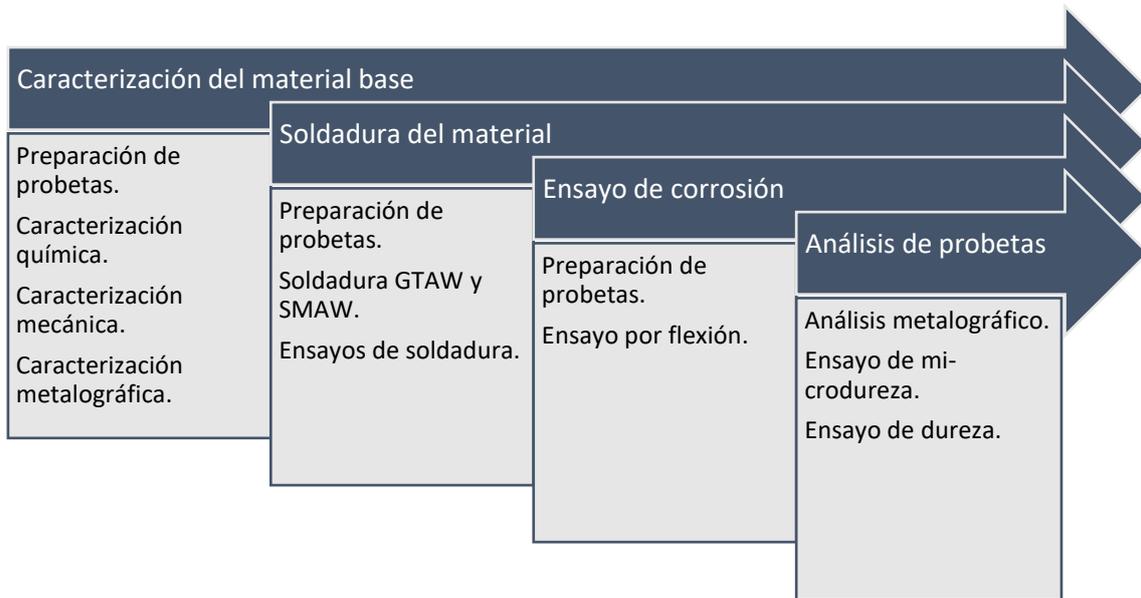


Figura 2-1 Metodología.

(Fuente: Propia).

La tubería utilizada API 5L-X52 cédula 40, tiene un diámetro exterior de $5 \frac{9}{16}$ pulgadas con un espesor promedio de 7,5 mm, después de caracterizar el material, las soldaduras que se realizaron en la tubería son con precalentamiento y sin precalentamiento, en cada uno de los diferentes procesos considerados. Una vez calificada la soldadura se realizó un ensayo de corrosión por flexión en tres puntos, posteriormente se analizaron las muestras corroídas. Todos los procesos realizados en esta investigación están basados en lineamientos de normas internacionales vigentes: API, ASTM, ASME, AWS.

2.1. Caracterización del material base

Al ser la tubería API 5L X52, una tubería de uso petrolero, sus características están estandarizadas bajo las normativas del Instituto Americano de Petróleo o por sus siglas en inglés API (American Petroleum Institute), específicamente se hace uso de la normativa API 5L, dentro de la cual se establece caracterizar el material y que estén

dentro del límite, establecido, tanto de sus propiedades mecánicas y sus propiedades químicas.

2.1.1. Mecánica

La caracterización mecánica se lo realiza mediante un ensayo de tracción, en el cual una probeta se somete a una carga hasta conseguir su ruptura, al realizar este proceso se puede reconocer propiedades mecánicas como: resistencia a la tracción, resistencia a la fluencia (límite elástico), carga máxima registrada, porcentaje de elongación.

2.1.1.1. Probetas de ensayo de tracción

Para dicha caracterización se utilizaron dos probetas con las dimensiones basadas en la norma API 5L, ilustradas en la Figura 2-2. Las cuales se obtuvieron realizando cortes en la tubería en orientación acorde al Anexo II.

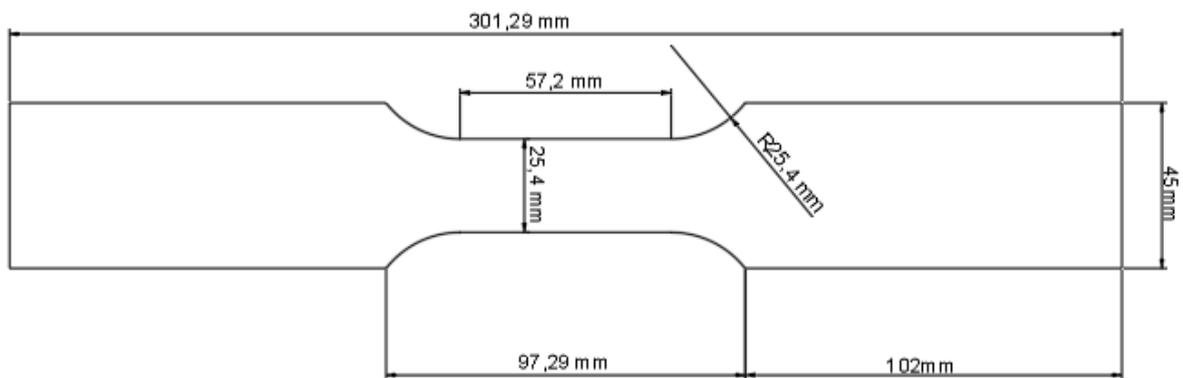


Figura 2-2 Probeta para caracterización del material.

(Fuente: Propia).

2.1.1.2. Equipo de ensayo de tracción

Este ensayo se llevó a cabo en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones (LAEV) de la Escuela Politécnica Nacional. El equipo utilizado, fue la máquina universal de ensayos, cuyas especificaciones técnicas se presentan en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1 Especificaciones: Máquina universal de ensayos.

Especificaciones: Máquina universal de ensayos	
Marca	TINIUS OLSEN (UNIVERSAL TESTING)
Modelo	SUPER L
Velocidad de ensayo	0-76 mm/min
Capacidad de Carga	3000 [kN]
Tipo de Sistema	Sistema hidráulico
Software	NAVIGATOR



(Fuente: propia).

2.1.1.3. Procedimiento del ensayo

- Preparar las probetas conforme a la norma API 5L.
- Tomar medidas del espesor de las probetas y registrarlas.
- Realizar dos marcas con un puntero metálico, las cuales establecerán la longitud G, la cual permitirá determinar la elongación del material de la probeta a ensayar.
- Colocar la probeta en la maquina universal de ensayos, sujetándola con las mordazas tipo cuña, calibrando la maquina en su posición inicial.
- Ingresar los parámetros de ensayo en la máquina, con los cuales estarán regidos el proceso.
- Tomar todos los datos correspondientes al ensayo hasta la ruptura de la probeta, estos datos son registrados por el software del equipo.
- Retirar la probeta ensayada y tomas las medidas finales de la misma, tanto su largo como ancho, y analizar la zona de fractura.

2.1.2. Química

Analizar la composición química de la tubería ayuda a determinar si los componentes químicos de esta, están dentro de los límites de la norma API 5L. El ensayo se lo realiza con un análisis de espectrometría por chista.

2.1.2.1. Probetas para caracterización química

Para este ensayo se requirió dos probetas extraídas de dos diferentes posiciones de la tubería, las dimensiones de estas probetas no son estandarizadas, se considera una

dimensión óptima de trabajo según la máquina a utilizar. Las dimensiones consideradas son 20x20x7,35 mm, ilustradas en la Figura 2-3.

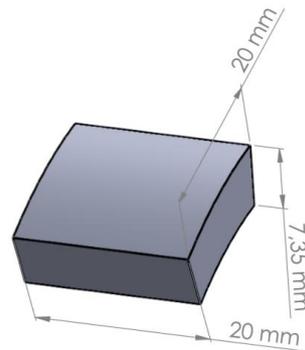


Figura 2-3 Probeta para caracterización química.

(Fuente: Propia).

2.1.2.2. Equipo para caracterización química

Este ensayo se lo realizó en el Laboratorio de Fundición de la Escuela Politécnica Nacional. Se utilizó un espectrómetro de chispa, con el software Elemental Suite. Las especificaciones técnicas del equipo se detallan en la Tabla 2-2.

Tabla 2-2 Especificaciones: Espectrómetro de chispa.

Especificaciones: Espectrómetro de chispa	
Marca	BRUKER
Modelo	Q2 ION
Voltaje	100/240 [V]
Frecuencia	50/60 [Hz]
Software	ELEMENTAL SUITE



(Fuente: Propia).

2.1.2.3. Procedimiento para la caracterización química

- Limpiar las probetas superficialmente según la norma ASTM E634-12 (Standard Practice for Sampling of Zinc and Zinc Alloys by Spark Atomic Emission Spectrometry)
- Purgar el espectrómetro de chispa con el uso de gas comprimido de argón.
- Ejecutar el software Elemental Suite, con el cual se puede observar en su interfaz el porcentaje de cada elemento químico que presenta la muestra.
- Colocar una probeta patrón, la cual sirve para calibrar el equipo, esta probeta debe hacer contacto con un electrodo del mismo material que la probeta, actuando como conductor.
- Colocar la muestra a analizar, después de calibrar el equipo, de manera que una de sus superficies haga contacto con el electrodo colocado.

- Seleccionar la opción comenzar en el software Elemental Suite, lo cual presenta los porcentajes de cada elemento químico presente en la muestra. Se utiliza el método Fe110 Low Alloy. Se realiza tres mediciones por muestra, y el resultado final de cada muestra es un promedio de las tres mediciones.

2.1.3. Metalografía

El ensayo metalográfico permite “determinar el tamaño de grano, forma y distribución de varias fases e inclusiones que tienen gran efecto sobre las propiedades mecánicas del metal. La microestructura revelará el tratamiento mecánico y térmico del metal y, bajo un conjunto de condiciones dadas, podrá predecirse su comportamiento esperado” (Avner, 1988).

El análisis se lo realizó con y sin la aplicación de un ataque químico en las superficies. El ataque se lo realiza con nital, el cual se lo utiliza en aceros al carbono, para oscurecer la perlita y darle un mejor contraste.

2.1.3.1. Probetas para caracterización metalográfica

Para este ensayo se utilizaron dos probetas extraídas de la tubería, una de ellas para realizar un análisis en la superficie paralela (superficie A) a la deformación introducida al material, mediante laminado en caliente, llevado a cabo durante el conformado de la tubería, y otra para un análisis a la superficie transversal (superficie B) a la dirección de esta deformación. Las dimensiones aproximadas de las probetas fueron de 15x15x7,35 mm, como muestra la Figura 2-4, la preparación de las probetas para en ensayo se basó en la norma ASTM E3-11 (Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens), las probetas ya preparadas se muestran en la Figura 2-5.

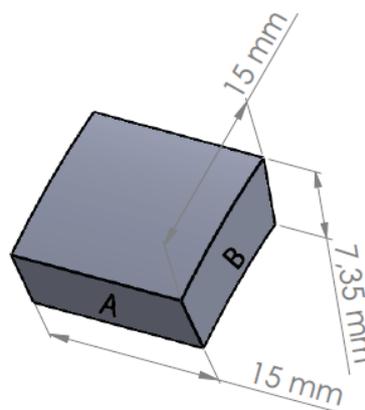


Figura 2-4 Probeta para ensayo metalográfico.

(Fuente: Propia).

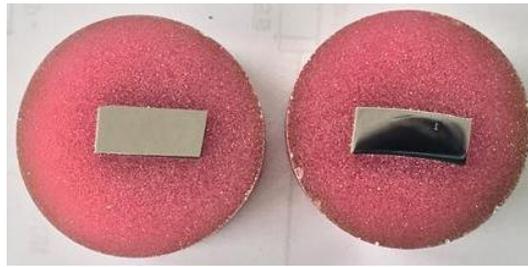


Figura 2-5 Probetas preparadas. Superficie A (izquierda), superficie B (derecha).

(Fuente: Propia).

2.1.3.2. Equipo para la caracterización metalográfica

El ensayo se llevó a cabo en el Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF) de la Escuela Politécnica Nacional. El proceso de preparación de las muestras requiere un desbaste grueso en la máquina desbastadora, pulido fino con la utilización de la maquina semiautomática FORCIMAT y el registro de fotos microscópicas con la utilización del microscopio invertido trinocular. Las especificaciones técnicas de los equipos se detallan en las Tablas 2-3, 2-4, 2-5, respectivamente.

Tabla 2-3 Especificaciones: Máquina de desbaste grueso.

Especificaciones: Maquina de desbaste grueso	
Marca	BRUKER
Modelo	121-0M84
Voltaje	100 – 120 [V]
Frecuencia	50/60 [Hz]
Potencia	1 [Hp]
Numero abrasivo	100 $\left[\frac{g}{cm^2}\right]$

(Fuente: Propia).

Tabla 2-4 Especificaciones: Pulidora semiautomática.

Especificaciones: Pulidora semiautomática	
Marca	FORCIMAT
Modelo	FORCIPOL/2018
Voltaje	230 [V]
Frecuencia	50/60 [Hz]
Potencia	0,75 [Hp]



(Fuente: Propia).

Tabla 2-5 Especificaciones: Microscopio invertido trinocular.

Especificaciones: Microscopio invertido trinocular	
Marca	OLYMPUS
Modelo	GX41F
Voltaje	100 – 120 [V] 230 – 240 [V]
Frecuencia	50/60 [Hz]
Potencia	85 [VA]



(Fuente: Propia).

2.1.3.3. Procedimiento para la caracterización metalográfica

- Preparar la probeta necesaria para el análisis, desbastando la superficie a examinar usando la desbastadora de disco, montar la probeta en un molde y verter en ella un compuesto de resina poliéster, catalizador y acelerador. Esperar que se seque completamente, esto generará una facilidad de trabajo en el ensayo.
- Realizar un desbaste grueso en las superficies de estudio (Superficies A, B) con lija No. 240, este trabajo ayuda a remover imperfecciones, ocasionadas por el corte realizado.
- Realizar un desbaste fino en las superficies de estudio, se utilizó una lija No. 1200.
- Pulir en grueso, mediante la utilización de un paño con alúmina de $0,3 \mu$ y lubricante de diamante.
- Pulir en fino, mediante la utilización de un paño con alúmina de 1μ y lubricante de diamante.

- Visualizar las superficies a estudiar con el microscopio, con un aumento de X100 y realizar un registro fotográfico de las mismas.
- Ejecutar un ataque químico con nital al 10% por un tiempo de 2 a 3 segundos, lavar con agua y alcohol al 99,8% y secar.
- Visualizar las superficies a estudiar con el microscopio, después del ataque químico, con aumentos de X100 y X500, realizar el debido registro.

Nota: Los parámetros para las operaciones de desbaste y pulido se establecen en la Tabla 2-6.

Tabla 2-6 Parámetros de operación de desbaste y pulido.

Operación	Insumos	Velocidad		Carga
		Plato	Cabezal	
Desbaste grueso	Lija No. 240	300 rpm	125 rpm	20 lb
Desbaste fino	Lija No. 1200	300 rpm	125 rpm	15 lb
Pulido grueso	Paño con alúmina de 0.3 μ	160 rpm	110 rpm	20 lb
Pulido fino	Paño con alúmina de 1 μ	160 rpm	125 rpm	15 lb

(Fuente: Propia).

2.2. Soldadura del material

La soldadura del material se lo realizó bajo la norma API 1104 (Welding of Pipelines and Related Facilities), la cual está destinada “a aplicarse a la soldadura de tuberías utilizadas en la compresión, bombeo y transmisión de petróleo crudo, productos derivados del petróleo, gases combustibles, dióxido de carbono y nitrógeno y, cuando corresponda, a los sistemas de distribución” (API 1104, 2013). Esta normativa detalla todo el proceso de soldadura, además indica las diferentes formas de valoración y evaluación de dichos procesos.

2.2.1. Preparación de probetas para la soldadura

Siendo las probetas de soldadura uno de los elementos más importantes en la presente investigación, ya que en torno a estas se ejecutaron diversos ensayos que deben cumplir con los requerimientos de la norma API 1104 sección 5.6 (Testing of Welded Joints) y posteriormente entrar en un proceso de corrosión, se consideró adecuado cortar transversalmente la tubería disponible de 1200 mm. en 8 partes iguales de 127mm., como se indica en la Figura 2-6. Se realizaron cortes oxiacetilénicos, ya que los extremos a soldarse posteriormente fueron maquinados con el fin de realizar los

biseles correspondientes, para la realización de los biseles se considera las recomendaciones de la norma API 1104 y AWS D1.1, las características se detallan en la especificación del procedimiento de soldadura o por sus siglas en inglés WPS (Welding Procedure Specification) mostrado en el ANEXO V.

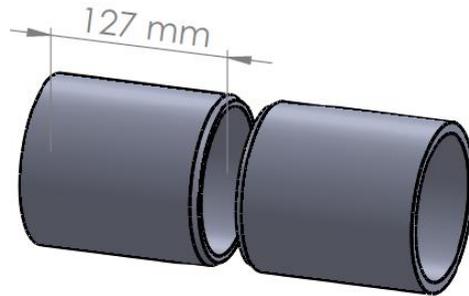


Figura 2-6 Probetas para soldadura.

(Fuente: Propia).

2.2.2. Pre calentamiento del material base

Debido a que se planteó realizar los procesos de soldadura SMAW y GTAW, se realizaron soldaduras sin pre calentamiento y con pre calentamiento, para cada uno de los procesos.

Para las soldaduras con pre calentamiento se requiere calcular dicha temperatura, por lo cual, se tomó como base el trabajo de titulación de Hidalgo D. y Lozada, H., 2007.

Para el cálculo es necesario determinar el carbono equivalente del material base para lo cual se utilizó la ecuación de Seferian (Ec. 1), misma que resulta de la suma entre el carbono químico (Ec 2) y el carbono equivalente de Seferian (Ec 3). Con estos valores acumulados de carbono se encontró la temperatura de pre calentamiento mediante la ecuación 4, de la siguiente manera:

$$[C] = [C]_{quimico} + [C]_{seferian} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

$$[C]_q = C + \frac{Mn + Cr}{9} + \frac{Ni}{18} + \frac{7}{90} Mo \quad \text{Ec. 2}$$

$$[C]_s = 0,005 * S * [C]_q \quad \text{Ec. 3}$$

Obteniendo así:

$$[C] = [C]_q (1 + 0,005 * S)$$

Remplazando datos de acuerdo a la norma API 5L tenemos:

$$[C] = 0,28 + \frac{14}{9}$$

$$[C] = 0,4516$$

De acuerdo con la ecuación de temperatura de precalentamiento:

$$Temp. \text{ precalentamiento} = 350 * \sqrt{[C] - 0,25} \quad \text{Ec. 4}$$

Entonces:

$$Temp. \text{ precalentamiento} = 350 * \sqrt{0,4516 - 0,25}$$

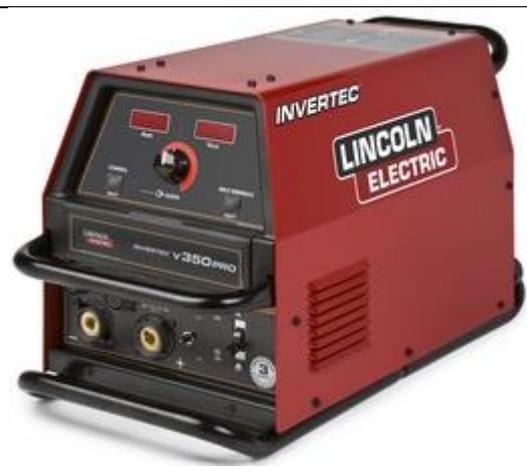
$$Temp. \text{ precalentamiento} = 157,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

2.2.3. Equipo de soldadura utilizado

Los procesos de soldadura se llevaron a cabo en el Laboratorio de Soldadura (LAB-SOLD) de la Escuela Politécnica Nacional. El equipo utilizado, es hábil tanto para el proceso de soldadura SMAW, así como en el proceso de soldadura GTAW. En la Tabla 2-7 se detalla las características de la máquina.

Tabla 2-7 Especificaciones: Equipo de soldadura.

Especificaciones: Equipo de Soldadura	
Marca	LINCOLN ELECTRIC
Modelo	Invertec V350 Pro
Voltaje	10 - 70 [V]
Amperaje	5 – 425 [A]
Frecuencia	60 [Hz]
Proceso	SMAW / GTAW



(Fuente: Propia).

2.2.4. Soldadura GTAW

El proceso de soldadura GTAW se realizó con y sin precalentamiento en el material base, con un proceso manual mediante un soldador calificado API, en el Laboratorio de Soldadura (LAB-SOLD) de la Escuela Politécnica Nacional.

2.2.4.1. Selección del electrodo no consumible y material de aporte

El electrodo no consumible utilizado para este proceso fue el EWTh-2 (según la AWS) con una aleación del 2% de torio, el cual posee óxido de torio entre 1,7 – 2,2 %.

El material de aporte adecuado para el proceso debe tener igual o mayor valor de resistencia mínima a la tracción del material base, en este caso como se muestra en el ANEXO I (Requerimientos de tracción para PSL1) la resistencia mínima a la tracción de la tubería es de 455 MPa, por lo cual el material de aporte seleccionado fue el alambre ER70S-6, mismo que ofrece una resistencia a la tracción mínima de 483 Mpa, siendo superior a la resistencia mínima a la tracción del material base, también este alambre por su composición química permite una mayor limpieza al momento de realizar el depósito. Las características del electrodo como del material de aporte se detallan en el apartado 1.2.5.1. del presente trabajo.

2.2.4.2. Criterios de soldadura

Los criterios de soldadura se especifican detalladamente en el ANEXO V donde se muestra el WPS (Welding Procedure Specification) correspondiente a la soldadura GTAW.

2.2.4.3. Procedimiento de soldadura GTAW

- Maquinar biseles y separar la junta maquinada a 3.9 mm. de acuerdo a como se indica en el WPS (ANEXO V).
- Puntear internamente la tubería para evitar desalineamiento.
- Fijar el material base en posición 6G.
- En el caso de realizar la soldadura con precalentamiento, precalentar el material base por medio de la llama oxiacetilénica.
- Realizar el pase de raíz de soldadura.
- Ejecutar los pases de rellenos adicionales, los cuales son 4.
- Finalmente, realizar la limpieza interna y externa del cordón de soldadura mediante una grata.

2.2.5. Soldadura SMAW

Este proceso de soldadura es el más usado para la tubería API 5L X-52 por su bajo costo, facilidad al soldar y escasez de defectos.

La soldadura se realizó con y sin precalentamiento en el material base, con un proceso manual mediante un soldador calificado API, en el Laboratorio de Soldadura (LAB-SOLD).

2.2.5.1. Selección del material de aporte

Al igual que el proceso de soldadura GTAW el material de aporte debe poseer igual o mayor resistencia mínima a la tracción. Se seleccionó el electrodo E7010, cuya resistencia mínima a la tracción es de 483 MPa, siendo esta mayor a la resistencia mínima a la tracción de la tubería, además, este electrodo presenta un alto contenido de celulosa que permite una alta penetración como se busca en la soldadura de la tubería. Las características del electrodo se detallan en apartado 1.2.6.2 del presente trabajo.

2.2.5.2. Criterios de soldadura

Los criterios de soldadura se especifican detalladamente en el ANEXO V, en donde se muestra el WPS (Welding Procedure Specification) correspondiente a la soldadura SMAW.

2.2.5.3. Procedimiento del proceso de soldadura

- Maquinar los biseles y separar la junta a soldarse de acuerdo como se indican en el WPS detallado en el ANEXO V.
- Separar la junta maquinada a 2 milímetros de acuerdo con la norma AWS 5.1 y puntear internamente la tubería para evitar desalineamiento.
- Fijar el material base en posición 6G.
- En el caso de realizar la soldadura con precalentamiento, precalentar el material base por medio de la llama oxiacetilénica.
- Realizar el pase de raíz de soldadura, controlando el amperaje de trabajo.
- Ejecutar los pases de rellenos adicionales, se realizaron 4 pases.
- Finalmente, realizar la limpieza interna y externa del cordón de soldadura mediante una grata.

2.2.6. Ensayos de soldadura

Los ensayos de soldadura determinan si una junta soldada cumple diversos requisitos de aceptación planteados por las diversas normativas, al ser una tubería de uso petrolero se aplica la normativa API 1104, los ensayos pueden ser destructivos y no destructivos, y nos permiten evaluar cualitativa y cuantitativamente los resultados, determinando de esa forma si la soldadura fue realizada correctamente.

El proceso de calificación utilizado se describe en la norma API 1104 sección 5.6 (Testing of Welded Joints-Butt Welds), según dicha sección por las características físicas de la tubería a soldar, se deben realizar un total de 8 ensayos a las probetas soldadas las cuales se dividen en ensayos de tensión, Nick break, doblado de raíz y doblado de cara, dicho requerimiento se muestra en la Tabla 2-8, las probetas deben obtenerse de ubicaciones según muestra la Figura 2-7, para cada tipo de ensayo. Se debe considerar que todos los ensayos se deben realizar a temperatura ambiente.

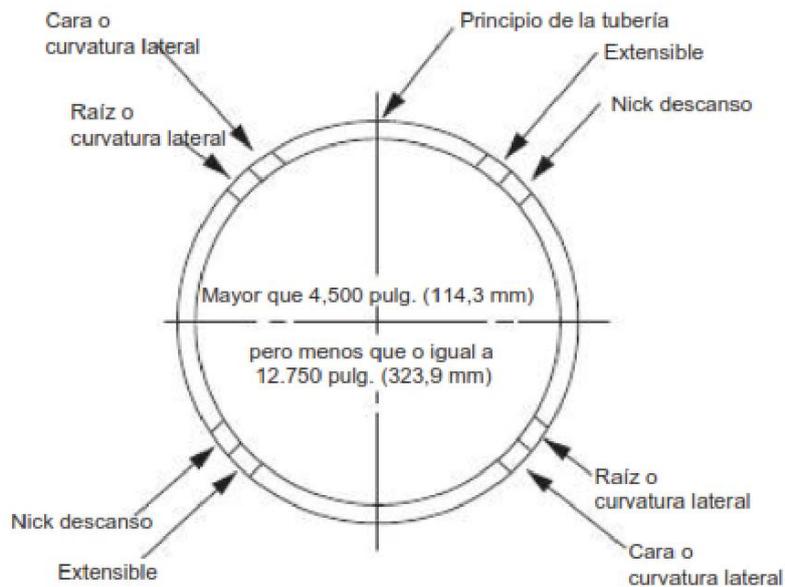


Figura 2-7 Ubicación de probetas para los diferentes ensayos.

(Fuente: Api 1104, 2013).

Tabla 2-8 Número de ensayos requeridos según el diámetro de la tubería.

Diámetro exterior		Numero de especímenes					
In.	Mm	Tensión	Nick break	Doblado raíz	Doblado cara	Doblado lateral	Total
Espesor Pared ≤ 0,500 pulg. (12,7mm)							
<2,375	<60,3	0	2	2	0	0	4
2,375 a 4,500	60,3 a 114,3	0	2	2	0	0	4
>4,500 a 12,750	>114,3 a 323,9	2	2	2	2	0	8
>12,750	>323,9	4	4	4	4	0	16
Espesor Pared > 0,500 pulg. (12,7mm)							
≤ 4,500	≤ 114,3	0	2	0	0	2	4
>4,500 a 12,750	>114,3 a 323,9	2	2	0	0	4	8
>12,750	>323,9	4	4	0	0	8	16

(Fuente: Api 1104, 2013).

2.2.6.1. Ensayo de tracción

El ensayo de tracción está descrito detalladamente en el apartado 2.1.1. En este caso se lo utilizó para evaluar las probetas soldadas, tomando como base la norma API 1104 sección 5.6.2 (Tensile Strength Test).

2.2.6.1.1 Probetas para ensayo de tracción

Para este ensayo se utilizaron dos probetas de cada tipo de soldadura, GTAW con y sin precalentamiento, y SMAW con y sin precalentamiento. Siendo un total de 8 probetas a analizar, para calificar cada tipo de soldadura. En la preparación y dimensionamiento de las probetas se consideró la normativa API 1104, las dimensiones se muestran en la Figura 2-8.

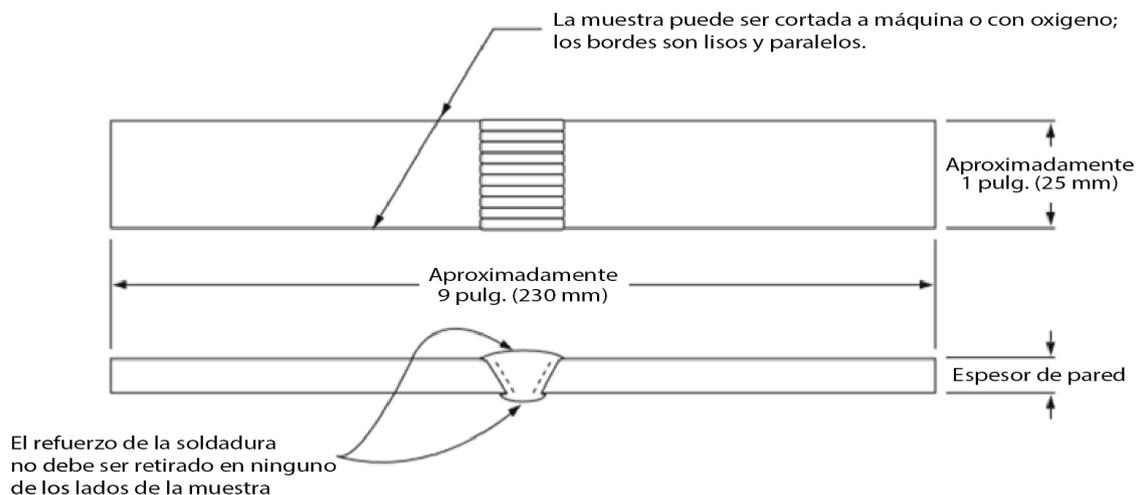


Figura 2-8 Probeta para ensayo de tracción.

(Fuente: API 1104, 2013).

2.2.6.1.2 Equipos para ensayo de tracción

El ensayo de tracción en las probetas soldadas se lo realizó en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones (LAEV). En la sección 2.1.1.2 del presente trabajo se indica las características del equipo utilizado.

2.2.6.1.3 Procedimiento para ensayo de tracción

En la sección 2.1.1.3 del presente trabajo se detalla el procedimiento del ensayo de tracción.

2.2.6.2. Ensayo de Nick Break

Según la norma (API 1104, 2013), este ensayo permite evaluar la fusión y penetración entre el material base y el material de aporte después del proceso de soldadura, también

nos permite visualizar defectos tales como porosidades o incrustaciones de escoria que pudieron quedarse atrapadas al ejecutar los pases de soldadura. Cabe recalcar que el ensayo de Nick-Break no evalúa ningún tipo de propiedad mecánica.

2.2.6.2.1 Probetas para ensayo de Nick Break

En este ensayo se utilizan las probetas con el mismo dimensionamiento del ensayo de tracción en las probetas soldadas, apartado 2.2.6.1. Utilizando dos probetas de cada tipo de soldadura, GTAW con y sin precalentamiento, y SMAW con y sin precalentamiento, siendo un total de 8 probetas a analizar, para calificar cada tipo de soldadura. Según la norma API 1104, se requiere la realización de una pequeña muesca a nivel de la soldadura tal como se indica en la Figura 2-9, esto con el fin de guiar la rotura, dicha muesca se la realiza de forma manual mediante la utilización de una sierra.

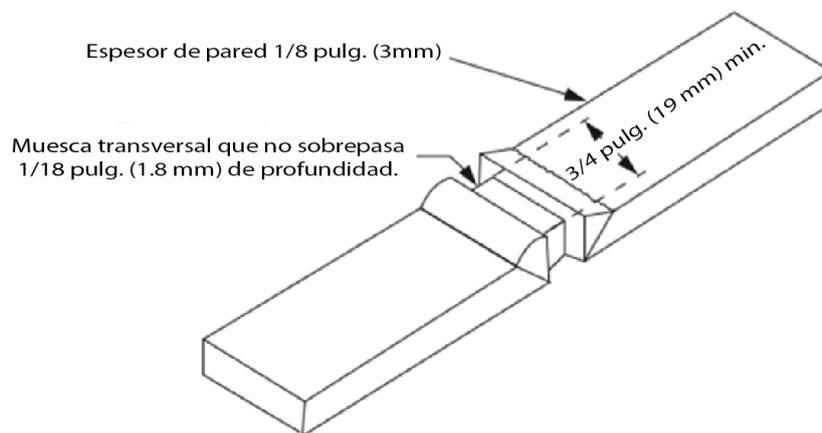


Figura 2-9 Probeta para ensayo de Nick Break.

(Fuente: API 1104, 2013).

2.2.6.2.2 Equipos para ensayo de Nick Break

Este ensayo se lo realizó en el Laboratorio de Soldadura de la Escuela Politécnica Nacional. Según el apartado 5.6.3.2 de la normativa API 1104, se puede causar la rotura de las probetas para el ensayo con golpes en la zona central de la probeta mientras está sujeta en sus extremos, por lo cual para este ensayo se utilizó herramienta menor.

2.2.6.2.3 Procedimiento para ensayo de Nick Break

Una vez ya soldada la tubería se precede a realizar lo siguiente:

- Seleccionar las probetas correspondientes al ensayo Nick Break, así como muestra en la Figura 2-7.
- Redondear los bordes longitudinales con una amoladora, con el fin de eliminar aristas vivas.

- Fijar la probeta y realizar la muesca alrededor de la soldadura, de aproximadamente 1,8 mm (1/18 pulg.).
- Doblar la probeta hasta provocar su fractura, sujetándola en los extremos y dando golpes en la zona central de la probeta.

2.2.6.3. Ensayo de doblado cara-raíz

Mediante los ensayos de doblado cara – raíz se evalúa superficialmente defectos y la aparición de fisuras. La diferencia entre el doblado de cara y de raíz es la orientación del doblado. A pesar de que existe un tipo de doblado más (doblado lateral), no se lo ha incluido en esta evaluación ya que para el diámetro del material base utilizado, la norma no exige realizar ese tipo de prueba.

2.2.6.3.1 Probetas para ensayo de doblado cara-raíz

En estos ensayos se utilizaron las probetas con el mismo dimensionamiento del ensayo de tracción y Nick-Break (sin el maquinado de muescas) como lo indica la Figura 2-8. Utilizando dos probetas de cada tipo de soldadura, GTAW con y sin precalentamiento, y SMAW con y sin precalentamiento, y para cada tipo de doblado, siendo un total de 16 probetas a analizar, para calificar cada tipo de soldadura con doblados de cara y de raíz.

2.2.6.3.2 Equipos para ensayo de doblado cara-raíz

Estos ensayos se lo realizaron en el Laboratorio de Soldadura. Las especificaciones técnicas del equipo se detallan en la Tabla 2-9.

Tabla 2-9 Especificaciones: Máquina para ensayos de doblado guiado

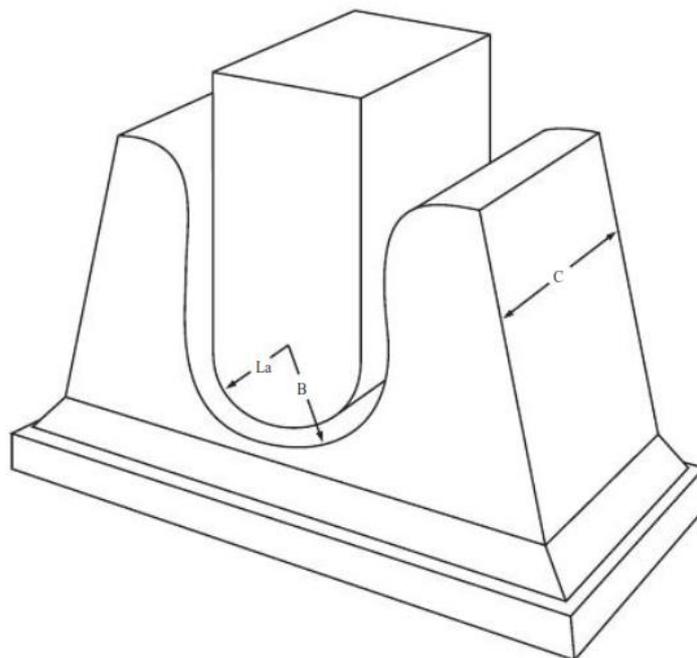
Especificaciones: Máquina para ensayos de doblado guiado	
Marca	S/N
Modelo	S/N
RPM (compresor)	1720
Tipo de Sistema	Sistema hidráulico



(fuente: Propia)

2.2.6.3.3 Procedimiento para ensayo de doblado

- Seleccionar las probetas para doblado de cara, así como de raíz, esto de acuerdo con el posicionamiento indicado en la Figura 2-7.
- Redondear los laterales de las probetas con una amoladora.
- Seleccionar el punzón de doblado normalizado bajo la norma API 1104, tal como se muestra en la Figura 2-10.
- Encender y calibrar la máquina de ensayo de doblez.
- Colocar la probeta con la cara o raíz hacia la parte externa (inferior), de acuerdo a cuál prueba se la realice.
- Centrar el cordón de soldadura con la zona inferior del émbolo.
- Accionar el empuje hasta que la probeta adquiera la forma del troquel.
- Regresar a posición inicial el embolo y extraer cuidadosamente la probeta doblada.
- Realizar el análisis visual correspondiente de cada una de las probetas dobladas.



NOTA Esta figura no está dibujada a escala. Radio de émbolo, $L_a = 1 \frac{3}{4}$ in (45 mm); radio de troquel, $B = 2 \frac{1}{2}$ in (60 mm); anchura de la matriz, $C = 2$ pulg. (50 mm).

Figura 2-10 Punzón para ensayo de doblado.

(Fuente: API 1104, 2013).

2.3. Ensayo de corrosión

Un ensayo de corrosión permite simular ambientes o situaciones corrosivas, con parámetros controlados, semejantes a ambientes reales en los cuales operan diversos

materiales, con el fin de evaluar la resistencia y comportamiento corrosivo. Para el presente trabajo de investigación se realizó un ensayo de corrosión bajo esfuerzos en tres puntos, en una cámara de niebla salina.

2.3.1. Características del ambiente de la cámara de salina

El ensayo se lo realizó bajo la norma ASTM B117-16 (Standart Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus), edición 2018, la cual regula las características de funcionamiento de la cámara de niebla salina y el manejo de las probetas.

En la sección 10.1, menciona que, la zona de exposición de la cámara de niebla salina se debe mantener a una temperatura de $35^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Para la determinación de la velocidad de atomización y ciclos de trabajo, se utilizaron medios experimentales, tomando en cuenta la sección 10.2, debía cumplir que, la niebla por cada 80 cm^2 de área de recolección horizontal, se recolectara de 1,0 a 2,0 mL de solución por hora. Considerando este parámetro y en base a las características del atomizador y equipos pertenecientes al Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla de la Escuela Politécnica Nacional, se estableció accionar el atomizador 5 min. cada 30 min., cumpliendo con los requerimientos de la norma.

Para la preparación de la solución salina se tomó como base la sección 8 de la normativa ASTM B117-16, la solución salina debe prepararse disolviendo $5 \pm 1\%$ de cloruro de sodio en 95% de agua destilada. El cloruro de sodio no debe tener más del 0.3% en masa de impurezas totales. El pH de la solución salina debe estar en un rango de 6,5 a 7,2. Cumpliendo con estas regulaciones se mezcló $52,63 \pm 10,52$ gr. de cloruro de sodio al 99,9% de pureza (Anexo VI) por cada 1 litro de agua destilada. Se prepararon aproximadamente 60 litros de solución salina en todo el proceso experimental.

2.3.2. Probetas para ensayo de corrosión

Según la norma ASTM G39-99 publicada en el 2016, sección 10.3, las probetas para flexión en tres puntos deben ser tiras planas que tenga de ancho entre 25 a 51 mm y de largo entre 127 a 254 mm. Debido a los porta-probetas existentes en el Laboratorio de Metalografía, se consideran las siguientes medidas para las probetas ilustradas en la Figura 2-11. Debido a que las muestras deben “mantenerse frías durante la operación de corte” (Avner, 1988). Para no alterar la condición metalúrgica del material, se realizan cortes en frío.

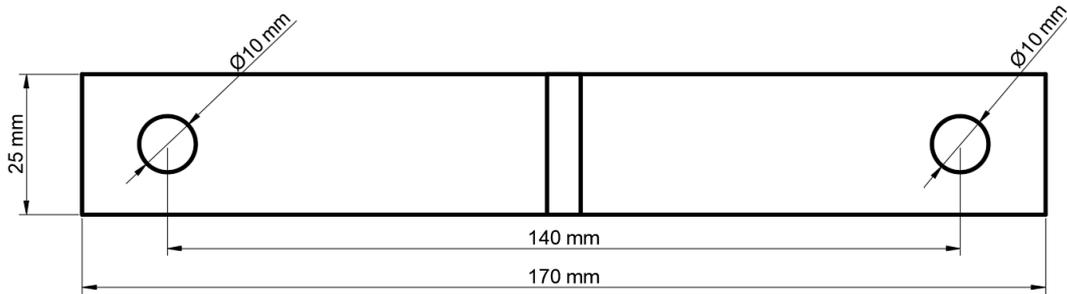


Figura 2-11 Probetas para ensayos de corrosión con flexión en tres puntos.

(Fuente: Propia).

2.3.3. Limpieza de probetas

La limpieza de las probetas se realizó en base a las normas ASTM G1-03 (Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens) y ASTM G39-99 (Standard Practice for Preparation and Use of Bent-Beam Stress-Corrosion Test Specimens). Al realizar la limpieza en las probetas antes y después del ensayo de corrosión se debe considerar que: “un procedimiento ideal de limpieza debería eliminar solo los productos de corrosión y no dar como resultado la eliminación de material base” (ASTM G1-03)

Las probetas antes de ser precargadas para examinarlas se deben desengrasar y limpiar para eliminar la contaminación que se produjo en el proceso de corte. En la limpieza después del ensayo de corrosión es factible utilizar un cepillo ligero de cerdas no metálicas, sumergiéndolas en agua destilada.

2.3.4. Porta-probetas para ensayo de corrosión

“Las pruebas de corrosión por tensión pueden realizarse bajo condiciones de desviación constante o de carga constante” (ASTM, 2014). Por lo cual para generar una carga constante en las probetas se requiere de un porta-probetas, que distribuya la carga sobre tres puntos, considerando que una de las cargas debe estar aplicada sobre el cordón de soldadura. Se utilizó los porta-probetas existentes en el Laboratorio de Metalografía, las cuales cumplen con los requerimientos de distribución de cargas aplicadas mostrados en la publicación STP 425, Strees Corrosion Testing, publicada por ASTM, ilustradas en la Figura 2-12.

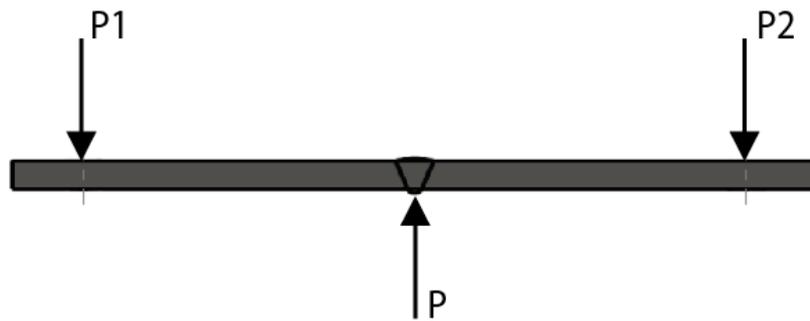


Figura 2-12 Diagrama de distribución de cargas.

(Fuente: Propia)

2.3.4.1. Características del porta-probetas

Los porta-probetas fueron hechos de acero al carbono, también se utilizó pernos de acero inoxidable M8x100, los cuales fueron soldados al material base. Las dimensiones y configuración se muestran en la Figura 2-13.

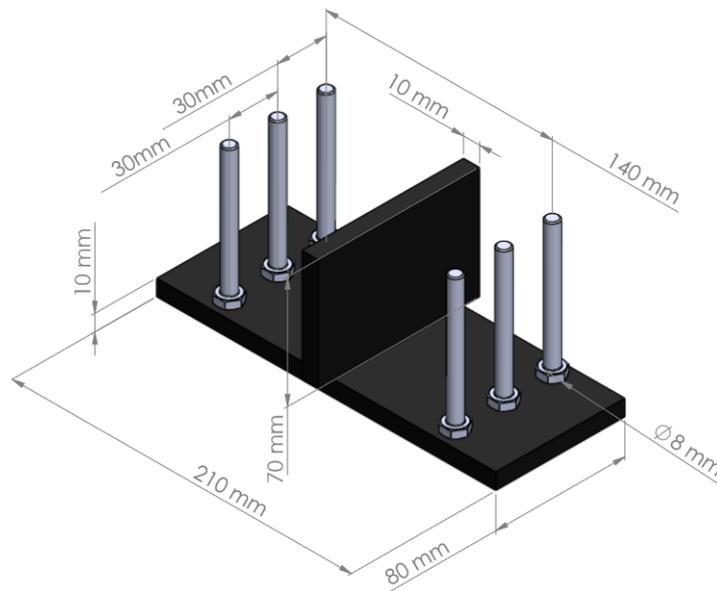


Figura 2-13 Porta probetas para ensayo de corrosión.

(Fuente: Propia).

El muelle central genera el apoyo vertical fijo y mediante los pernos, utilizando tuercas y arandelas, se aplicó fuerzas en los extremos de las probetas, mediante torques establecidos.

Debido a que “se deben tomar precauciones para asegurar que no se pueda producir corrosión galvánica entre las muestras y los soportes” (ASTM STP 425, 2014). Se consideró pintar los porta-probetas con pintura anticorrosiva, también al montar las probetas se coloca materiales no corrosivos aislando el contacto entre las probetas y el

porta-probetas. Para el contacto entre el muelle central y la probeta se utilizó caucho, tomado de la cámara de una llanta, en el caso del contacto entre los pernos, tuercas y arandelas con la probeta se los aisló con teflón. Cada porta-probeta puede cargar a tres muestras como se indica en la Figura 2-14.

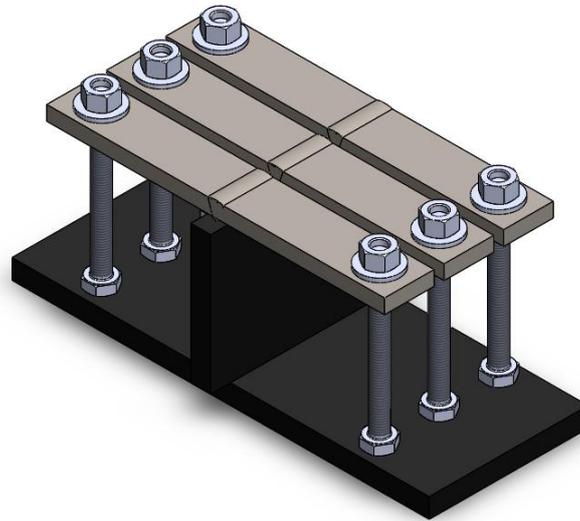


Figura 2-14 Probetas colocadas en el porta-probetas.

(Fuente: Propia)

2.3.5. Cargas aplicadas

Según la norma ASTM G39- 99 (Standard Practice for Preparation and Use of Bent-Bean Stress-Corrosion Test Specimens), la magnitud de la carga aplicada constante debe estar por debajo del límite elástico.

2.3.5.1. Cálculo de las cargas aplicadas

Según la ASTM STP 425, 2014, para el cálculo de la fuerza aplicada en el ensayo de corrosión por flexión en tres puntos se considera la ecuación 5:

$$y = \frac{PL^2}{6ED} \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

y = Deformación (m)

P = Presión Aplicada (MPa)

E = Modulo elástico (MPa)

D = Espesor de la probeta (m)

L = Lardo de la probeta (m)

Se calculó la máxima deformación de la probeta, tomando en cuenta el límite elástico del material de la tubería según la norma API 5L:

Datos:

P = 359 (MPa) (límite elástico considerado)

E = 200000 (MPa)

D = 0,0072 (m)

L = 0,14 (m)

$$y_{max} = \frac{(359MPa)(0,3m)^2}{6(19500Mpa)(0,0072m)}$$

$$y_{max} = 0,00083 \text{ m}$$

Se consideró una deformación de $0,0008m \approx 0,8 \text{ mm}$ para que la probeta no sobrepase su límite elástico y no tienda a deformarse, con esta consideración se calculó la carga máxima que puede resistir la probeta antes de su deformación con la ecuación 6.

Despejamos P :

$$P = \frac{6EDy_{max}}{L^2} \quad \text{Ec. 6}$$

$$P = \frac{6(200000MPa)(0,0072m)(0,0008m)}{(0,14m)^2}$$

$$P = 352,653 \text{ MPa}$$

Al considerar el diagrama de distribución de cargas mostrados en la Figura 2-12. Se definió la ecuación 7:

$$\sum P = 0$$

$$P_1 + P_2 = P$$

$$P_1 = P_2$$

$$P_1 = \frac{P}{2}$$

Ec. 7

Por lo cual la carga P_1 es la carga necesaria en cada perno:

$$P_1 = \frac{352,653 MPa}{2} = 176,326 MPa$$

Esta carga se le aplicó mediante ajustar pernos en los tonillos del porta-probetas, por lo cual, se calculó el torque máximo que debía ser aplicado a cada perno.

Teniendo en cuenta las medidas del perno inoxidable A2-70 de diámetro 0,79 cm = 0.0079 m se determina el área del perno mediante la ecuación 8.

$$A = \pi r^2 \quad \text{Ec. 8}$$

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

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

Aplicando la ecuación 9, que relaciona la fuerza, presión y el área tenemos:

$$F = P \cdot A \quad \text{Ec. 9}$$

$$F = (176,326 MPa)(4,90 \times 10^{-5} m^2)$$

$$F = 8642,94 N$$

Según (Budynas R., 2008), para poder calcular el par de torsión necesario para bajar una carga, se aplica la ecuación 10:

$$T_b = \frac{F d_m (\mu \pi d_m - l)}{2 (\pi d_m + \mu l)} \quad \text{Ec. 10}$$

Datos:

Diámetro mayor	$d = 0,375 \text{ in} \approx 0,0095m$
Diámetro medio	$d_m = 0,333 \text{ in} \approx 0,0084m$
Diámetro menor	$d_r = 0,292 \text{ in} \approx 0,0074m$
Paso	$p = 0,083 \text{ in} \approx 0,0021m$
Coeficiente de rozamiento	$\mu = 0,015$
Ángulo de avance	$\alpha = 14,5^\circ$
Hilos por pulgada	16

Para el cálculo del avance (l), se aplica la ecuación 11, este avance es la distancia que se desplaza una tuerca en forma paralela al eje del tornillo cuando esta da una vuelta:

$$l = \tan \alpha_F * \pi d_m$$

Ec. 11

$$l = \tan 14,5^\circ * \pi(0,0084m)$$

$$l = 0,0068m$$

Entonces:

$$T_b = \frac{8642,944 N * 0,0084m}{2} \left(\frac{0,015 * \pi * 0,0084m - 0,0068m}{\pi * 0,0084m + 0,015 * 0,0068m} \right)$$

$$T_b = -8,809 Nm$$

Se considera aplicar tres cargas diferentes que no sobrepasen el límite elástico, en cada perno se aplicó el 10%, 50% y 80% del torque máximo calculado, los valores se presentan en la Tabla 2-10.

Tabla 2-10 Valores del torque aplicado.

Torque aplicado	
Torque máximo	-8,809 [Nm]
Porcentajes de torque aplicado	
25% T_b	-2,023 [Nm]
50% T_b	-4,404 [Nm]
80% T_b	-7,047 [Nm]

(Fuente: Propia).

2.3.6. Distribución de muestras

Se analizaron un total de 12 muestras, cada una, con una diferenciación ya sea de carga aplicada o del proceso de soldadura. Se utilizó cuatro porta-probetas, en cada una de ellas se colocó tres muestras con igual características en su soldadura, pero, con tres tipos de cargas diferentes aplicadas. Se realiza la nomenclatura de las probetas y su distribución como se indica en la Tabla 2-11.

Tabla 2-11 Nomenclatura de las probetas corrosión por flexión en tres puntos.

Proceso de soldadura	Tratamiento término	Carga aplicada	Código	Número de porta-probetas
SMAW (5)	Sin precalentamiento (0)	25% (1)	501	1
		50% (2)	502	
		80% (3)	503	
	Con precalentamiento (9)	25% (1)	591	2
		50% (2)	592	
		80% (3)	593	

GTAW (6)	Sin precalentamiento (0)	25% (1)	601	3
		50% (2)	602	
		80% (3)	603	
	Con precalentamiento (9)	25% (1)	691	4
		50% (2)	692	
		80% (3)	693	

(Fuente: Propia).

2.3.7. Posición de las probetas dentro de la cámara de niebla salina

La posición de las probetas dentro de la cámara de niebla salina está en base a la norma ASTM B117-16, edición 2018, sección 7.1, establece que las probetas deben estar en un soporte o suspendidas entre 15° y 30° con respecto de la vertical. Esto se lo realizó mediante unos soportes de acrílico que dan la inclinación necesaria para el cumplimiento de la norma, como se muestra en la Figura 2-15.

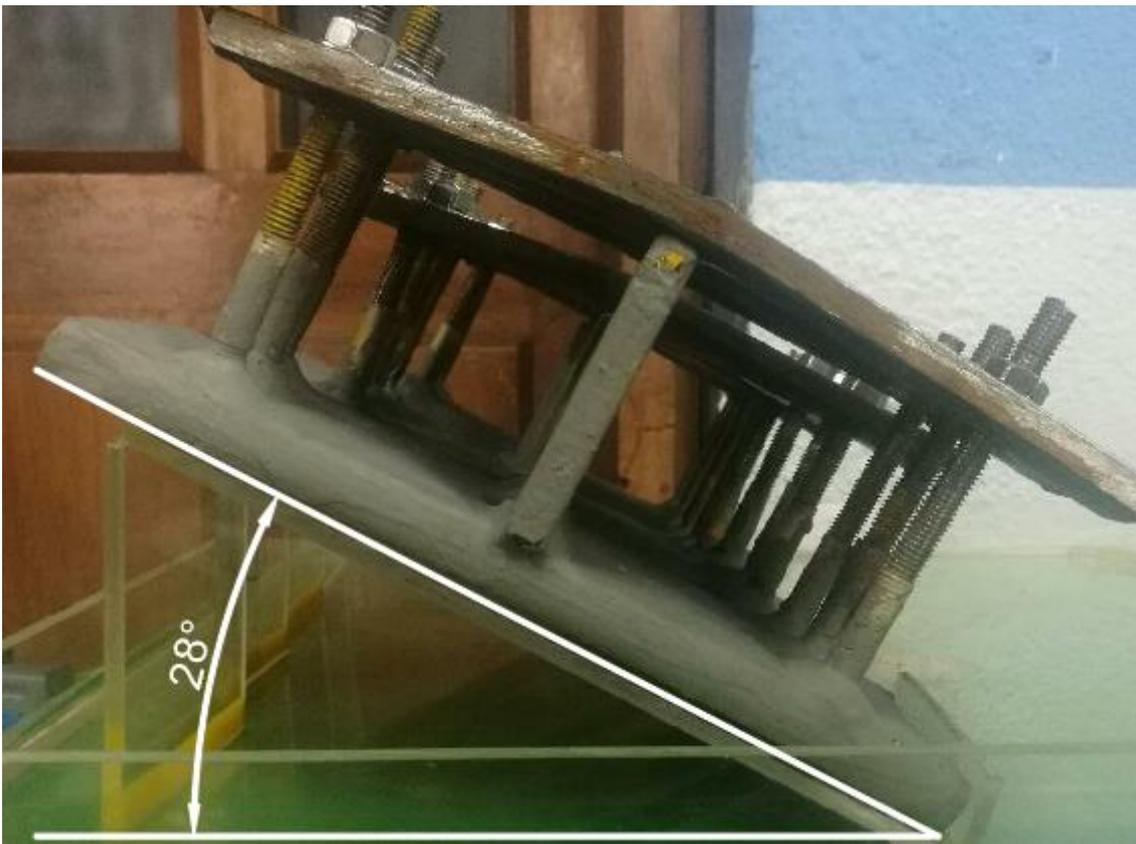


Figura 2-15 Ángulo de inclinación de las muestras.

(Fuente: Propia).

2.3.8. Velocidad de corrosión

Para determinar la velocidad de corrosión promedio o por sus siglas en inglés CR (corrosion rate), se consideró la norma G1-03 (Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens), sección 8, la cual presenta la ecuación 12:

$$CR = \frac{K \times W}{A \times T \times D} \quad \text{Ec. 12}$$

Donde:

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

T = tiempo de exposición [h]

A = área inicial total de la muestra [cm^2]

W = pérdida de masa total [gr]

D = densidad $\left[7,85 \frac{gr}{cm^3}\right]$; densidad de un acero al carbono (Shigley, 2018).

2.3.9. Análisis estadístico

Debido a que se necesita realizar un análisis comparativo entre los procesos de soldadura para determinar cuál de estos presenta menor efecto de la corrosión, se propone realizar un análisis estadístico.

Según la normativa ASTM G16-13 (Standard Guide for Applying Statistics to Analysis of Corrosion Data), 2019. Para el análisis de los datos de corrosión se puede realizar un análisis estadístico de varianza o por sus siglas en inglés ANOVA, este análisis permite determinar si las medias poblacionales (promedios) de diferentes experimentos tienen diferencias que sean significativas al compararlos.

Para poder establecer si existen diferencias significativas, se determinan niveles de significancia, generalmente estos niveles son del 1%, 5% y 10%. Para el presente trabajo se utiliza un nivel de significancia del 5% (0,05), lo que implica que, si el resultado del análisis estadístico da una significancia menor a 0,05, se considera significativa la comparación, es decir tiene importancia, caso contrario si los valores son mayores a 0,05, las comparaciones son insignificantes y estadísticamente no existiría variación entre los experimentos a comparar.

Para el análisis se utiliza el programa estadístico SPSS (Statistical Package for the Social Sciences), del desarrollador International Business Machines Corporation (IBM).

2.3.10. Macroscopías

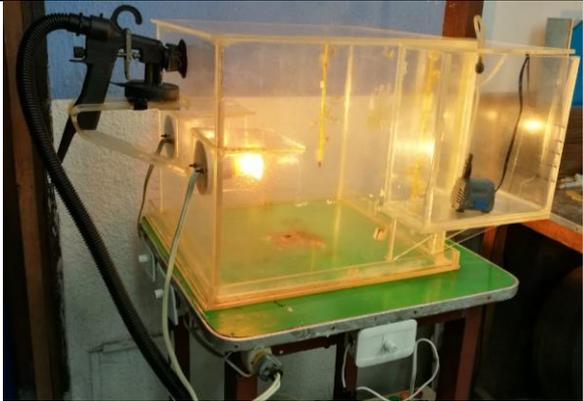
Una de las herramientas utilizadas para realizar un seguimiento del avance de corrosión en las probetas analizadas fueron las macrográficas, en las cuales se puede evidenciar con la ayuda de un microscopio las diferentes discontinuidades, tales como grietas, picaduras por corrosión, etc. Se enfocó el análisis en la zona de la soldadura, la cual, consta del cordón de soldadura y en la zona afectada por el calor (ZAC).

2.3.11. Equipo para ensayo de corrosión

El ensayo de corrosión se realizó en el Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla (LMDF), las características técnicas del equipo para el ensayo de corrosión se muestran en la Tabla 2-12, y para las herramientas de medición utilizadas se presentan en las Tablas 2-13, 2-14, 2-15, 2-16.

Tabla 2-12 Especificaciones: Cámara de niebla salina.

Especificaciones: Cámara de niebla salina	
Marca	S/N
Modelo	S/N
Capacidad de liquido	10 litros
Tipo de Sistema	Sistema hidráulico



(Fuente: Propia).

Tabla 2-13 Especificaciones: Balanza de precisión.

Especificaciones: Balanza de precisión	
Marca	CITIZEN
Modelo	M2
Capacidad	0 - 500 [g]
Precisión	0,01 [g]
Tipo de lectura	Digital



(Fuente: Propia).

Tabla 2-14 Especificaciones: Torquímetro digital Wrench.

Especificaciones: Torquímetro digital Wrench.	
Marca	ECLATORQ
Modelo	ADE2-030BN
Unidades de medida	Nm – lbf/ft
Rango de Torque	1,5 – 30 [Nm]
Tipo de lectura	Digital



(Fuente: Propia).

Tabla 2-15 Especificaciones: Microscopio metalográfico.

Especificaciones: Microscopio metalográfico	
Marca	OLYMPUS
Modelo	SZX7
Voltaje	100–120/230–240 [V]
Frecuencia	50/60 [Hz]
Indicadores zoom	0,8X, 1X, 1,25X, 1,6X, 2X, 2,5X, 3,2X, 4X, 5X, 5,6X
Sistema de iluminación	Guías de fibra óptica.
Software	Stream Essentials



(Fuente: Propia).

Tabla 2-16 Especificaciones: Cortadora.

Especificaciones: Cortadora	
Marca	W.J. Sawge Co. Ing.
Serial No.	SN-10-10T86-199
Refrigeración	Sistema hidráulico
Características del motor	Marca: Lincoln Potencia: 10 [Hp] Velocidad: 1745 [rmp] Amperaje: 26/13 [A] Voltaje: 230/460 [V] Frecuencia: 60 [Hz]



(Fuente: Propia).

2.3.12. Procedimiento del ensayo de corrosión

- Preparar las probetas, limpiarlas y medir la masa inicial de cada una.
- Colocar las probetas en los porta-probetas, y aplicar las cargas establecidas en la Tabla 2-11, respectivamente.
- Marcar las probetas de acuerdo a la Tabla 2-12.
- Preparar el equipo para el ensayo de corrosión de acuerdo a las condiciones establecidas en el apartado 2.3.1, se debe controlar periódicamente el rango de funcionamiento del equipo.
- Colocar las muestras en la cámara de niebla salina de acuerdo al apartado 2.3.5., con dirección al flujo de niebla salina, tomando en cuenta la superficie dominante de las muestras.
- Verificar que las probetas estén libres de contacto con otros materiales, o ya sea entre ellas. Comprobar que no existan goteos de solución salina entre probetas.
- En el tiempo programado para la revisión, apagar el equipo de corrosión, desmontar las probetas.
- Limpiar totalmente las probetas corroídas y el equipo de ensayo de corrosión (en el caso de las porta-probetas se volverán a pintar con pintura anticorrosiva para cuidar su integridad, y evitar contaminaciones en el ambiente de ensayo).
- Controlar el avance de la corrosión mediante macroscopías metalográficas, y la medición de masa, a cada una de las probetas.

El proceso se repetirá hasta cumplir con el tiempo establecido para el ensayo, una vez finalizado se debe realizar microscopías a cada de las probetas ensayadas.

2.4. Análisis de probetas corroídas

El análisis de las probetas corroídas nos permite determinar el efecto de la corrosión en las muestras analizadas, tanto en su microestructura como en sus propiedades físicas. Para el presente trabajo se realizaron análisis metalográficos, ensayos de micro dureza y dureza.

2.4.1. Análisis metalográfico

El análisis metalográfico se lo describe con detalle en el apartado 2.1.3. En este caso se utilizó este ensayo para analizar las probetas después de su proceso de corrosión, y así determinar los posibles cambios metalográficos o defectos en el material base, en el cordón de soldadura y en la zona afectada por el calor, ocasionados por la corrosión.

2.4.1.1. Probetas para el análisis metalográfico

Para este ensayo se utilizaron todas las probetas a las cuales se les realizó el ensayo de corrosión, estas probetas se describen en la Tabla 2-11, el corte de las probetas se lo realizó de forma transversal al cordón de soldadura para que sea posible un análisis

tanto del material base, el cordón de soldadura y la zona afectada por el calor. El corte realizado a las probetas se muestra en la Figura 2-16. Las dimensiones consideradas aproximadamente se ilustran en la Figura 2-17, la preparación de las probetas para el ensayo se basó en la norma ASTM E3-11 (Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens).

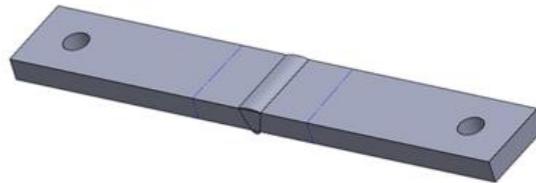


Figura 2-16 Ubicación del corte realizado

(Fuente: Propia).

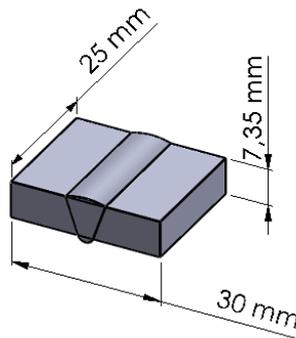


Figura 2-17 Probeta para análisis metalográfico.

(Fuente: Propia).

2.4.1.2. Equipo para el análisis metalográfico.

El ensayo para el análisis metalográfico se lo realizó en el Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla (LMDF), los detalles del equipo utilizado se describen en el apartado 2.1.3.2.

2.4.1.3. Procedimiento para el análisis metalográfico.

En la sección 2.1.3.3. del presente trabajo se detalla el procedimiento a realizarse para el análisis metalográfico.

2.4.2. Ensayo de dureza

“Una prueba de dureza es un medio para determinar la resistencia a la penetración y ocasionalmente se emplea para obtener una aproximación rápida de la resistencia a la

tracción” (ASTM A370, 2018). Este ensayo permite determinar la resistencia de una superficie al comprimirla con otra superficie de mayor dureza, mediante la aplicación de cargas estáticas en un determinado tiempo, en el cual, se cuantifica las dimensiones de la huella impresa. Se destacan dos métodos para la medición, la dureza Rockwell que toma como base la norma ASTM E18-19 (Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials) y la dureza Brinell con referencia a la norma ASTM E10-18 (Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials).

En los ensayos se realizaron dos barridos longitudinales, los cuales permitieron determinar la dureza en el cordón de soldadura (material de aporte), en la zona afectada por el calor y en el material base (MA, ZAC y MB).

2.4.2.1. Probetas para ensayo de dureza

El ensayo se realizó en las mismas probetas corroídas, utilizadas en el análisis metalográfico. Sin embargo, las muestras fueron desbastadas para que sus superficies sean totalmente planas y paralelas.

2.4.2.2. Equipo para ensayo de dureza

El ensayo se realizó en el Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF). El equipo utilizado fue el durómetro Rockwell, cuyas características técnicas se muestran a continuación, en la Tabla 2-17.

Tabla 2-17 Equipo para ensayo de dureza.

Especificaciones: Durómetro Rockwell	
Marca	HARDROCKER
Modelo	HR 150-A
Carga	60, 100, 150 [kgf]
Indentadores	Punta de acero de 1/16 pulg. Cono de diamante.
Escalas de medición	Rockwell A Rockwell B Rockwell C
Tipo de lectura	Analógico



(Fuente: Propia).

2.4.2.3. Procedimiento para ensayo de dureza

- Generar un paralelismo en las probetas a ensayar mediante desbaste, se lo realiza en la pulidora semiautomática, con una lija No. 150.

- Preparar el equipo de ensayo, seleccionando la escala de dureza a utilizar mediante giros en sentido horario a la debida perilla, y colocar el indentador adecuado para la escala seleccionada.
- Posicionar correctamente en la probeta, poniendo en contacto la punta del indentador y la zona a analizar.
- Encerar el equipo.
- Girar la perilla horizontal hasta que la aguja del marcador de tres vueltas de 360°.
- Cargar la máquina y esperar que se estabilice la aguja del marcador.
- Descargar la máquina y generar un registro de la medición.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados de los ensayos realizados, con su respectivo análisis en base a normativas y trabajos relacionados, llegando a validar o no los resultados obtenidos.

3.1. Resultados

Al haber terminado el proceso experimental se presenta los resultados recopilados de los ensayos y procesos realizados.

3.1.1. Caracterización mecánica del material base

Según el informe emitido por el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones (LAEV), ANEXO VII, el material base presentó las siguientes características mecánicas, que se indican en la Tabla 3-1, en la Figura 3-11 se muestra una gráfica referencial a estas mediciones.

Tabla 3-1 Resultados del ensayo de tracción del 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	
T1	25,87	7,42	19,943	88,711	62,3	429,3	67,0	462,1	43,9
T2	25,61	7,14	19,141	85,143	62,5	431,1	67,5	465,6	43,9

(Fuente: LAEV, 2018)

En la Figura 3-1 se muestra la zona de fractura de las probetas de caracterización del material base luego de ser sometidas al ensayo de tracción.



Figura 3-1 Probetas ensayadas a tracción.

(Fuente: Propia)

3.1.2. Caracterización química del material base

Según el informe emitido por el Laboratorio de Fundición, ANEXO VII, el material base presentó la siguiente composición química, que se indica en la Tabla 3-2 y en la Figura 3-12 se muestra una gráfica referencial a estas mediciones.

Tabla 3-2 Resultados de la caracterización química.

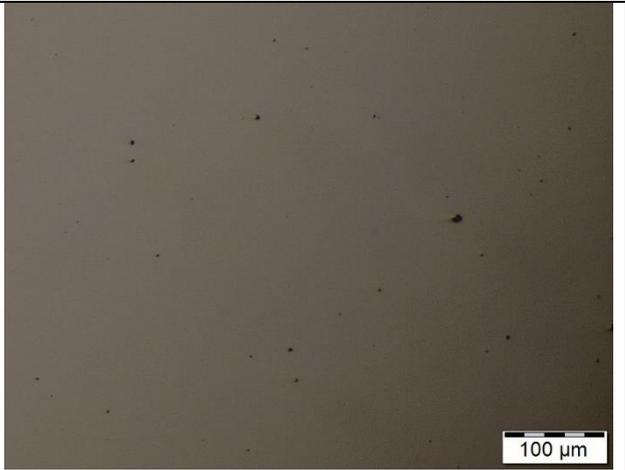
	Muestra M1	Muestra M2
Elemento	Valor [%]	Valor [%]
Carbono [C]	0,113	0,103
Silicio [Si]	0,231	0,253
Manganeso [Mn]	0,936	1,051
Fósforo [P]	0,020	0,025
Cromo [Cr]	0,067	0,073
Molibdeno [Mo]	0,025	0,030
Níquel [Ni]	0,070	0,091
Cobre [Cu]	0,069	0,072
Aluminio [Al]	0,021	0,021
Hierro [Fe]	98,44	98,27
Total	99,99	99,98

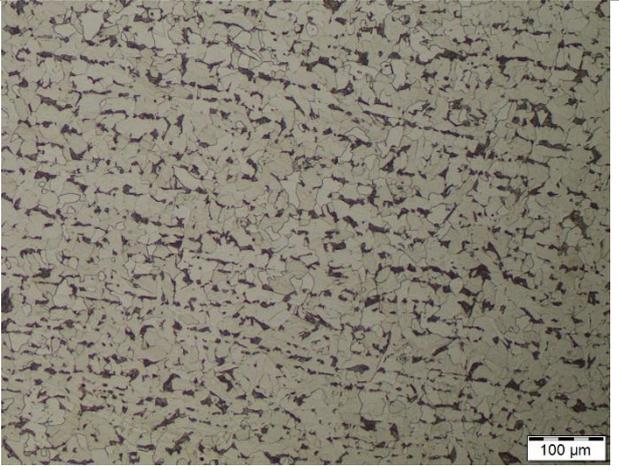
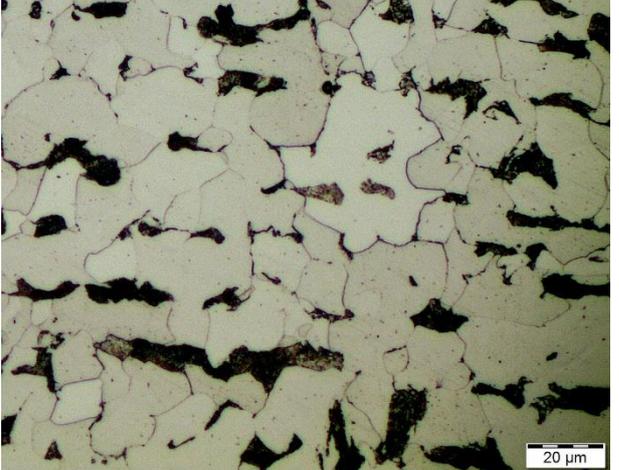
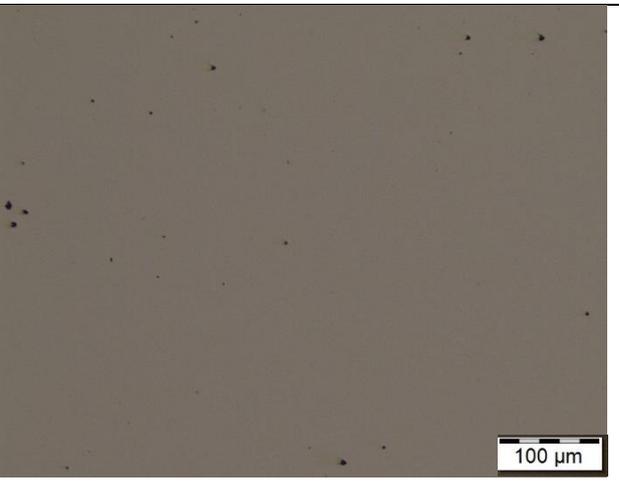
(Fuente: Laboratorio de fundición, 2018)

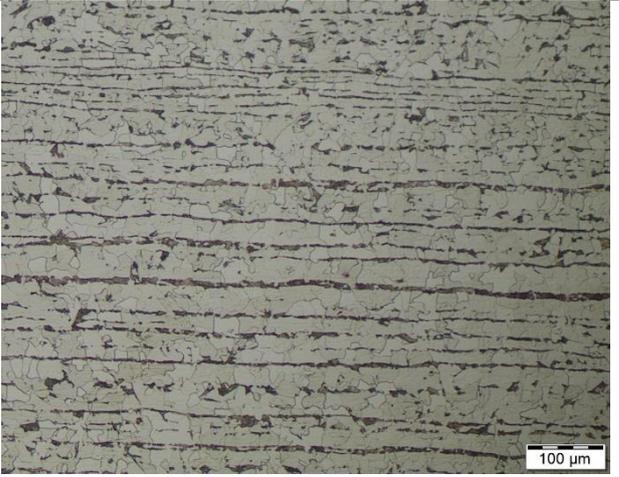
3.1.3. Caracterización metalográfica del material base

En la Tabla 3-3 se observan las metalografías de las probetas del material base, en las cuales se destaca un microestructura ferrítico (fase clara) -perlítica (fase oscura), las metalografías fueron tomadas en la cara transversal (M1) y lateral (M2) de la muestra con respecto al laminado de la tubería.

Tabla 3-3 Resultados del ensayo metalográfico del material base transversal longitudinal.

Id.	Detalle	Ampliación	Observaciones	Imagen
M1	Muestra transversal del material base, sin ataque químico.	X100	Se destaca la presencia de inclusiones no metálicas.	

M1	Muestra transversal del material base, con ataque químico.	X100	Se visualiza una Matriz ferrítico-perlítica.	
M1	Muestra transversal del material base, con ataque químico.	X500	Se presencia mayor cantidad de ferrita con respecto a la perlita.	
M2	Muestra lateral del material base, sin ataque químico.	X100	Se destaca la presencia de inclusiones no metálicas.	

M2	Muestra lateral del material base, con ataque químico.	X100	Matriz ferrítico-perlítica. La perlita destaca una orientación en el sentido del laminado.	
M2	Muestra lateral del material base, con ataque químico.	X500	Mayor presencia de ferrita sobre perlita. La perlita tiene una clara orientación en el sentido del laminado del material.	

(Fuente: Propia)

3.1.4. Proceso de soldadura

Durante el proceso de soldadura, tanto el material base como el material de aporte reciben calor, según el manual de soldadura de la sociedad americana de soldadores (AWS Welding Handbook, 2001), este valor se puede calcular utilizando ecuación 13:

$$Q = \frac{A * V * 60}{S * 1000} \quad \text{Ec. 13}$$

Donde:

Q= Calor de entrada (KJ/mm)

A=Intensidad de corriente (Amperios)

V=Voltaje (Voltios)

S= Velocidad de avance (mm/min)

La Tabla 3-4 muestra el resultado de entrada de calor para los procesos de soldadura en estudio, en cada pase de soldadura.

Tabla 3-4 Resultado de calor de entrada de soldadura

Proceso	Número de pase	Amperaje (A)	Voltaje (V)	Vel. Avance (mm/min)	Calor entrada Q (KJ/mm)
SMAW SP	1	75	27,6	280	0,44
	2	90	28,4	290	0,53
	3	93	26,8	300	0,50
	4	95	26,8	300	0,51
	5	90	34,5	290	0,64
SMAW CP	1	75	27,6	280	0,44
	2	90	28,4	290	0,53
	3	93	26,8	300	0,50
	4	95	26,8	300	0,51
	5	90	34,5	290	0,64
GTAW SP	1	114	9,6	35	1,88
	2	104	10,4	42	1,55
	3	104	10,8	44	1,53
	4	104	10,8	51	1,32
	5	114	10,2	41	1,70
GTAW CP	1	114	9,6	36	1,82
	2	104	10,4	43	1,51
	3	104	10,8	44	1,53
	4	104	10,8	51	1,32
	5	114	10,2	40	1,74

(Fuente: Propia)

3.1.4.1. Dimensionamiento de la ZAC

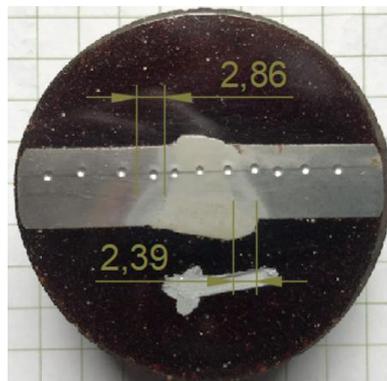
Al realizar un proceso de soldadura unas de las zonas importantes es la zona afectada por el calor (ZAC), ya que se necesita verificar el efecto del precalentamiento en los diferentes tipos de soldadura. Para poder realizar las mediciones las probetas debieron ser atacadas químicamente.

La medición de la ZAC a las probetas testigo identificadas como SW, SC, GW, GC, se realizó mediante el software AutoCad. Se tomaron dos medidas por cada probeta y se calculó el valor promedio de la dimensión de la ZAC, dando como resultado los datos presentados en la Tabla 3-5. Y en la Figura 3-2, se presentan las mediciones de la ZAC realizadas a las probetas.

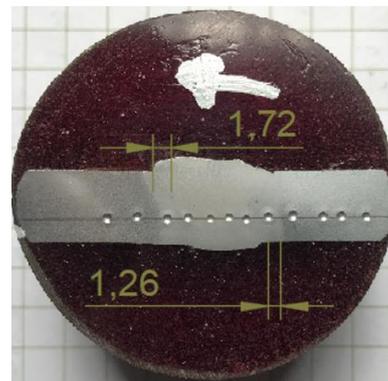
Tabla 3-5 Valores de la ZAC de probetas testigo

Proceso de soldadura	SMAW		GTAW	
	Sin precalentamiento	Con precalentamiento	Sin precalentamiento	Con precalentamiento
Id. Probeta	SW	SC	GW	GC
Valores (mm)	2,86	1,72	2,77	1,92
	2,39	1,26	2,58	2,13
Promedio (mm)	2,625	1,49	2,675	2,025

(Fuente: Propia)



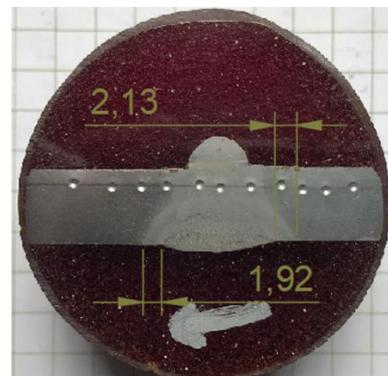
a) Probeta SMAW sin precalentamiento



b) Probeta SMAW con precalentamiento



c) Probeta GTAW sin precalentamiento



d) Probeta GTAW con precalentamiento

Figura 3-2 Valores tomados de la ZAC

(Fuente: Propia)

3.1.5. Ensayos mecánicos de soldadura

3.1.5.1. Ensayo de tracción

Según el informe emitido por el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones (LAEV), ANEXO VII, las juntas soldadas presentan las siguientes características mecánicas, que se indican en la Tabla 3-6 y en la Figura 3-13 se muestra una gráfica referencial a estas mediciones.

Tabla 3-6 Resultados del ensayo de tracción en las probetas soldadas.

Soldadura	Id. Probeta	Ancho promedio	Espesor promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		Obs.
		mm	mm	lbf	N	ksi	MPa	
GTAW S/P	GW 1	30,27	7,52	23,963	106,592	67,9	468,3	FMB
GTAW S/P	GW 7	25,45	7,47	20,429	90,875	69,3	478,0	FMB
SMAW S/P	SW 1	29,11	7,53	22,896	101,848	67,4	464,6	FMB
SMAW S/P	SW 7	28,86	7,45	22,040	98,037	66,1	456,0	FMB
GTAW C/P	GC 1	30,27	7,52	23,665	105,266	67,1	462,4	FMB
GTAW C/P	GC 7	30,03	7,39	22,934	102,016	66,7	459,7	FMB
SMAW C/P	SC 1	26,45	7,34	19,857	88,327	66,0	455,0	FMB
SMAW C/P	SC 7	29,59	7,48	21,887	97,360	66,0	455,3	FMB

(Fuente: LAEV, 2018)

En la Figura 3-3 se muestra la zona de fractura de las probetas soldadas, se destaca que en todas las probetas ensayadas se genera la rotura en el material base, luego de ser sometidas al ensayo de tracción.



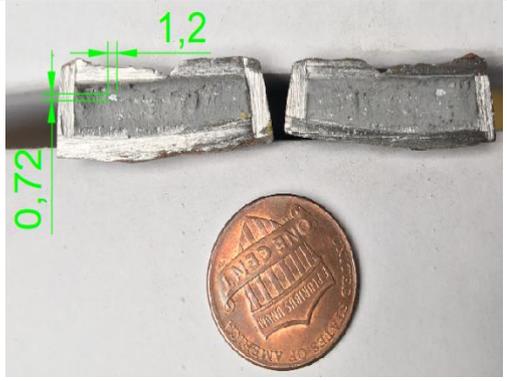
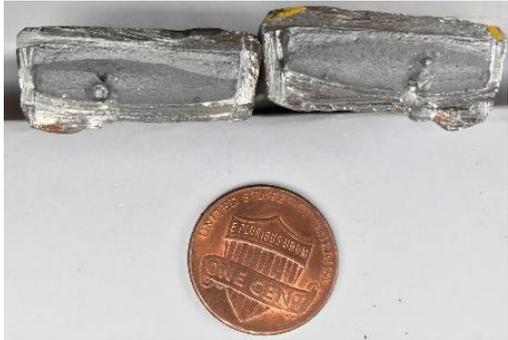
Figura 3-3 Probetas soldadas ensayadas a tracción.

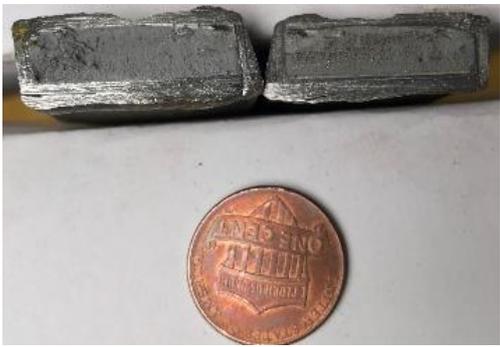
(Fuente: Propia)

3.1.5.2. Ensayo de Nick-Break

En la Tabla 3-7, se muestran los resultados del ensayo de Nick-Break de las diferentes probetas soldadas, con las diversas observaciones en cada una de las probetas.

Tabla 3-7 Resultados ensayo de Nick-Break.

Soldadura	GTAW sin precalentamiento	
Id. Probeta	GW2	GW8
Resultado		
Obs.	No se observa indicaciones abiertas.	No se observa indicaciones abiertas.
Soldadura	SMAW sin precalentamiento	
Id. Probeta	SW 2	SW 8
Resultado		
Obs.	No se observa indicaciones abiertas.	Inclusión de escoria: 0,72 x 1,2mm
Soldadura	GTAW con precalentamiento	
Id. Probeta	GC 2	GC 8
Resultado		
Obs.	No se observa indicaciones abiertas.	Porosidad: 0,41mm

Soldadura	SMAW con precalentamiento	
Id. Probeta	SC 2	SC 8
Resultado		
Obs.	Porosidad: 0,84mm	No se observa indicaciones abiertas.

(Fuente: Propia)

3.1.5.3. Doblado de cara y raíz

En las Tabla 3-8, 3-9 se muestran los resultados del ensayo de doblado de cara y doblado de raíz, respectivamente.

Tabla 3-8 Resultados del doblado de cara.

Soldadura	GTAW sin precalentamiento	
Id. Probeta	GW 4	GW 10
Resultado		
Obs.	No se observa indicaciones abiertas.	No se observa indicaciones abiertas.
Soldadura	SMAW sin precalentamiento	
Id. Probeta	SW 4	SW 10
Resultado		
Obs.	No se observa indicaciones abiertas.	No se observa indicaciones abiertas.

Soldadura	GTAW con precalentamiento	
Id. Probeta	GC 4	GC 10
Resultado		
Obs.	No se observa indicaciones abiertas.	No se observa indicaciones abiertas.
Soldadura	SMAW con precalentamiento	
Id. Probeta	SC 4	SC 10
Resultado		
Obs.	No se observa indicaciones abiertas.	No se observa indicaciones abiertas.

(Fuente: Propia)

Tabla 3-9 Resultados del doblado de raíz.

Soldadura	GTAW sin precalentamiento	
Id. Probeta	GW 5	GW 11
Resultado		
Obs.	No se observa indicaciones abiertas.	No se observa indicaciones abiertas.
Soldadura	SMAW sin precalentamiento	
Id. Probeta	SW 5	SW 11
Resultado		
Obs.	No se observa indicaciones abiertas.	No se observa indicaciones abiertas.

Soldadura	GTAW con precalentamiento	
Id. Probeta	GC 5	GC 11
Resultado		
Obs.	No se observa indicaciones abiertas.	No se observa indicaciones abiertas.
Soldadura	SMAW con precalentamiento	
Id. Probeta	SC 5	SC 11
Resultado		
Obs.	No se observa indicaciones abiertas.	No se observa indicaciones abiertas.

(Fuente: Propia)

3.1.6. Ensayo de dureza

El ensayo de dureza se lo realizó en todas las probetas, obteniéndose los datos presentados en la Tabla 3-10 e ilustrados en las Figuras 3-4 y 3-5 para los procesos de soldadura SMAW y GTAW, respectivamente. Todas las durezas están medidas en escala HRB (Hardness Rockwell B).

Tabla 3-10 Medida de dureza en probetas.

Tipo de soldadura	SMAW								GTAW							
	Sin precalentamiento				Con precalentamiento				Sin precalentamiento				Con precalentamiento			
Carga aplicada	N/A	25%	50%	80%												
Id. Probeta	50	501	502	503	59	591	592	593	60	601	602	603	69	691	692	693
MB	76	76	75	79	77	77	76	81	77	77	76	78	76	76	78	79
	77	77	76	80	78	78	76	83	78	78	77	79	77	77	79	80
ZAC	83	83	84	83	87	83	81	85	80	81	80	80	78	78	80	81
MA	89	94	93	96	93	94	93	94	82	82	81	81	82	82	82	83
ZAC	86	83	81	85	88	82	82	84	80	81	80	79	79	78	81	82
MB	77	80	77	83	77	80	79	83	77	78	77	78	75	76	79	79
	77	76	77	82	77	79	75	82	75	77	76	77	74	75	79	78

(Fuente: Propia)

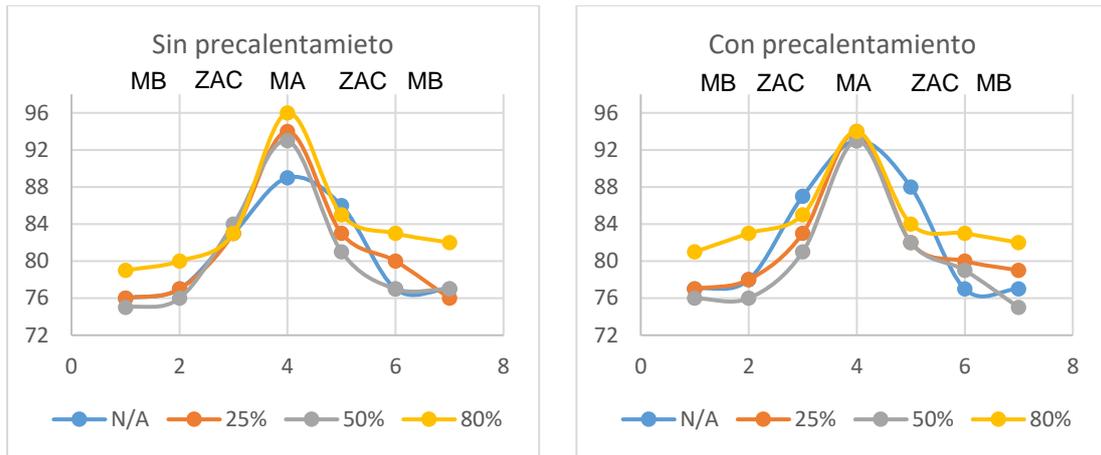


Figura 3-4 Ensayo de dureza para el proceso de soldadura SMAW
(Fuente: Propia).

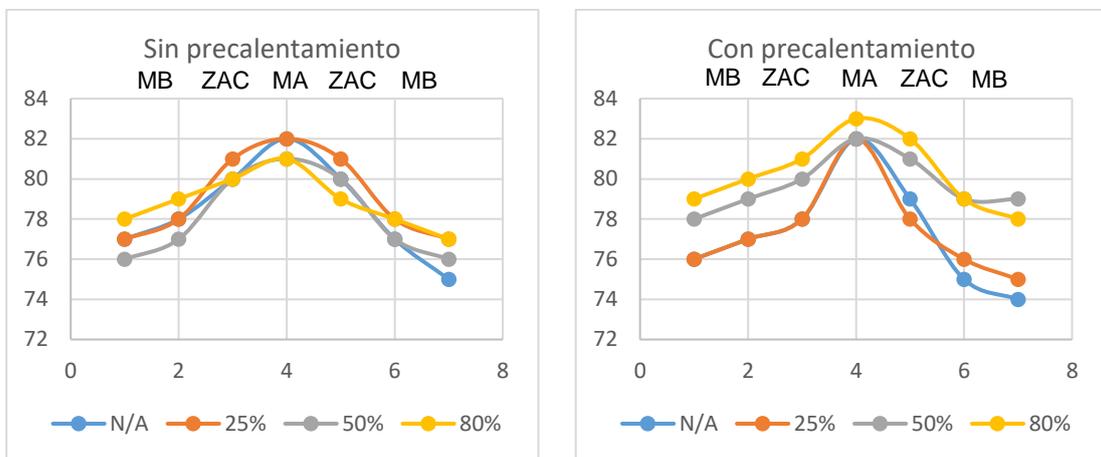


Figura 3-5 Ensayo de dureza para el proceso de soldadura GTAW
(Fuente: Propia).

3.1.7. Ensayo de corrosión

3.1.7.1. Evaluación visual por macrografías

Como se indica en la sección 2.3.3 del presente trabajo, se menciona que las limpiezas fueron realizadas cada semana, es decir cada 168 horas. Al realizar dichas limpiezas se tomaron macrografías con el fin de registrar el avance de la corrosión, el resultado de este registro se muestra en el ANEXO VIII.

3.1.7.2. Evaluación visual por micrografías

Las micrografías se realizaron una vez terminado el tiempo determinado para el ensayo de corrosión, en el ANEXO IX, se presentan todas las fotografías tomadas a las probetas ensayadas. Las tomas fueron realizadas con y sin ataque químico, con aumentos de X100 y X500.

3.1.7.3. Pérdida de masa

En los controles de limpieza de las probetas analizadas, se realizaron mediciones de masa de cada una, después de su respectiva limpieza, se presenta un registro por semana de la masa de cada probeta en la Tabla 3-11 y se ilustra en la Figura 3-6. En la Figura 3-7 se presenta una gráfica normalizada considerando el cociente entre el peso de las probetas en cada semana del ensayo de corrosión con respecto al peso original.

Tabla 3-11 Registro de pérdidas de masa.

Peso en cada semana de análisis [gr]													
Id. probeta	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
501	295,55	295,04	294,34	293,42	292,51	291,1	289,57	288,05	286,64	285,08	282,82	281,33	279,51
502	300,00	299,55	298,5	297,51	296,23	294,58	293,29	292,15	290,35	288,81	285,79	284,07	281,21
503	281,29	280,91	279,67	278,71	277,89	276,64	275,73	274,42	273,3	271,64	268,85	266,19	263,82
591	277,65	276,97	275,45	274,22	272,95	272,13	269,31	268,16	266,88	265,69	264,12	262,54	260,95
592	301,51	300,67	299,64	298,03	296,84	295,81	292,58	291,23	288,97	287,44	285,74	283,25	278,11
593	276,03	275,39	274,68	273,26	272,17	271,27	270,06	268,27	266,43	265,11	262,54	260,81	258,33
601	322,01	321,44	320,71	319,5	318,49	317,01	314,47	312,51	310,53	308,91	306,65	305,85	303,26
602	266,52	266,02	265,38	264,58	263,33	261,76	260,4	258,76	257,73	256,52	254,31	252,95	249,55
603	289,59	289,06	288,49	287,63	285,85	284,69	283,09	281,8	280,64	279,39	277,32	275,65	273,92
691	324,48	323,57	322,35	320,89	319,6	318,12	316,32	315,07	312,97	311,65	308,78	306,48	304,88
692	311,91	310,96	309,77	308,55	307,19	306,29	304,37	303,23	300,71	299,39	296,29	293,3	290,77
693	338,68	337,84	337,04	335,84	334,6	332,86	330,76	329,37	327,13	325,59	322,61	321,35	319,33

(Fuente: Propia).

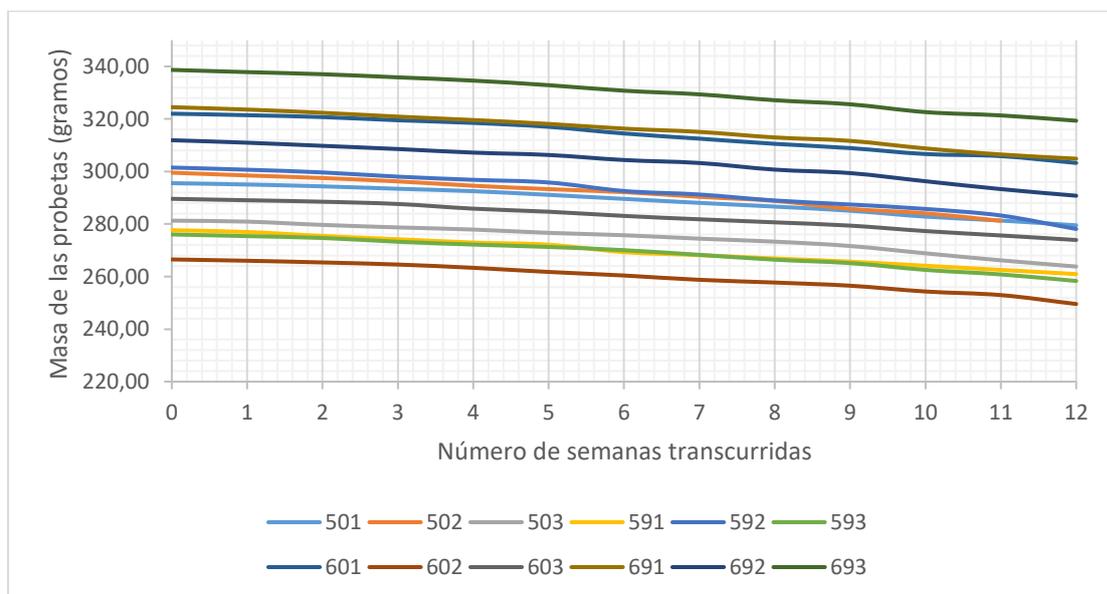


Figura 3-6 Registro de pérdida de masa.

(Fuente: Propia).

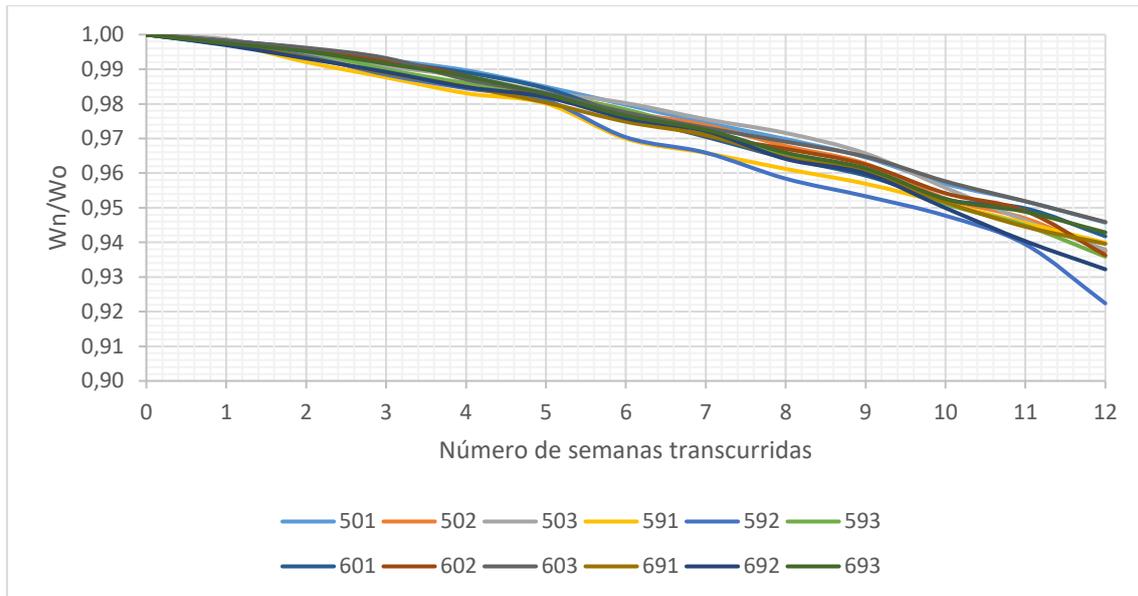


Figura 3-7 Coeficiente entre el peso de las probetas ensayadas en cada semana con respecto al peso inicial.

(Fuente: Propia).

Se procede encontrar las diferencias (W) de masa entre semana, 168 horas, para cada una de las probetas. Este proceso se lo realiza hasta la semana 12, considerando un tiempo total de 2016 horas de análisis experimental. En la Tabla 3-12 y Figura 3-8 se presenta un registro de las diferencias de masa, con las características de carga y tipo de soldadura para cada una de las probetas.

Tabla 3-12 Diferencias de masa por semana.

Tipos de Soldadura	Carga [%]	Id. Probeta	Diferencia de masa para las semanas transcurridas											
			W_1 [gr]	W_2 [gr]	W_3 [gr]	W_4 [gr]	W_5 [gr]	W_6 [gr]	W_7 [gr]	W_8 [gr]	W_9 [gr]	W_{10} [gr]	W_{11} [gr]	W_{12} [gr]
SMAW S/P	25	501	0,51	0,70	0,92	0,91	1,41	1,53	1,52	1,41	1,56	2,26	1,49	1,82
	50	502	0,45	1,05	0,99	1,28	1,65	1,29	1,14	1,80	1,54	3,02	1,72	2,86
	80	503	0,38	1,24	0,96	0,82	1,25	0,91	1,31	1,12	1,66	2,79	2,66	2,37
SMAW C/P	25	591	0,68	1,52	1,23	1,27	0,82	2,82	1,15	1,28	1,19	1,57	1,58	1,59
	50	592	0,84	1,03	1,61	1,19	1,03	3,23	1,35	2,26	1,53	1,70	2,49	5,14
	80	593	0,64	0,71	1,42	1,09	0,90	1,21	1,79	1,84	1,32	2,57	1,73	2,48
GTAW S/P	25	601	0,57	0,73	1,21	1,01	1,48	2,54	1,96	1,98	1,62	2,26	0,80	2,59
	50	602	0,50	0,64	0,80	1,25	1,57	1,36	1,64	1,03	1,21	2,21	1,36	3,40
	80	603	0,53	0,57	0,86	1,78	1,16	1,60	1,29	1,16	1,25	2,07	1,67	1,73
GTAW C/P	25	691	0,91	1,22	1,46	1,29	1,48	1,80	1,25	2,10	1,32	2,87	2,30	1,60
	50	692	0,95	1,19	1,22	1,36	0,90	1,92	1,14	2,52	1,32	3,10	2,99	2,53
	80	693	0,84	0,80	1,20	1,24	1,74	2,10	1,39	2,24	1,54	2,98	1,26	2,02

(Fuente: Propia).

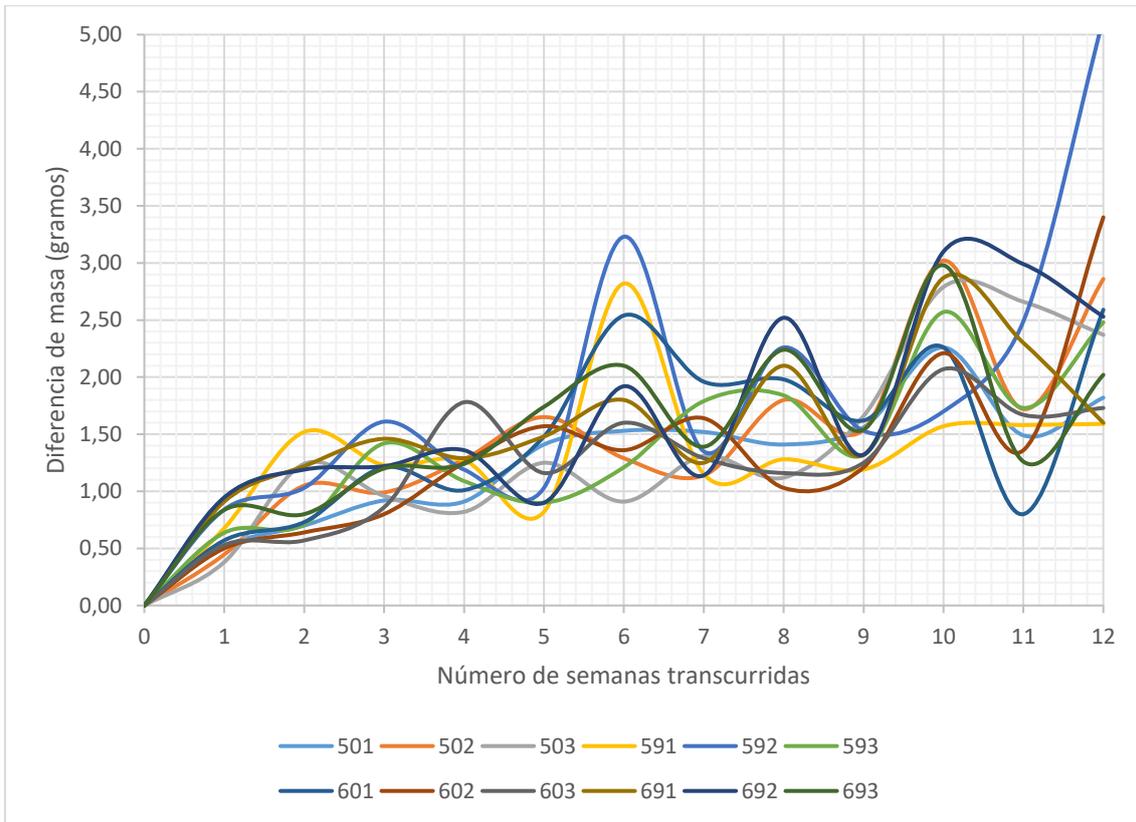


Figura 3-8 Diferencias de masa por semana
(Fuente: Propia).

Al recopilar los datos de forma experimental se considera tener valores atípicos que se hayan generado en el proceso, dichos valores pueden ser descartados, tomando como base la normativa E178-16a (Standard Practice for Dealing With Outlying Observations), 2016. En esta normativa se recomienda seguir un método de prueba Dixon, que utiliza una relación entre el valor atípico y su vecino más próximo, dividiendo por el espacio entre el valor más grande y el valor pequeño del grupo de análisis, como se muestra en la ecuación 14:

$$r_c = \frac{x_n - x_{n-1}}{x_{m\acute{a}x} - x_{m\acute{i}n}} \quad \text{Ec. 14}$$

Donde:

x_n = valor atípico a analizar

x_{n-1} = valor vecino más próximo (valor anterior)

$x_{m\acute{a}x}$ = valor mayor de la muestra

$x_{m\acute{i}n}$ = valor mínimo de la muestra

El resultado de estos valores se compara con la Tabla 2 (Criterios de Dixon para la prueba de observación extrema) de dicha normativa, se utiliza un criterio de nivel de

significancia del 10%, con 12 observaciones realizadas. Para estas características el índice de Dixon es 0,490, si un valor calculado es mayor a este índice, este se lo considera como un valor atípico y debe ser descartado. La base de datos sin valores atípicos fue utilizada en el resto del análisis correspondiente a las pérdidas de masa y velocidad de corrosión.

La grafica de pérdidas de masa en función del tiempo se ilustra en la Figura 3-9.

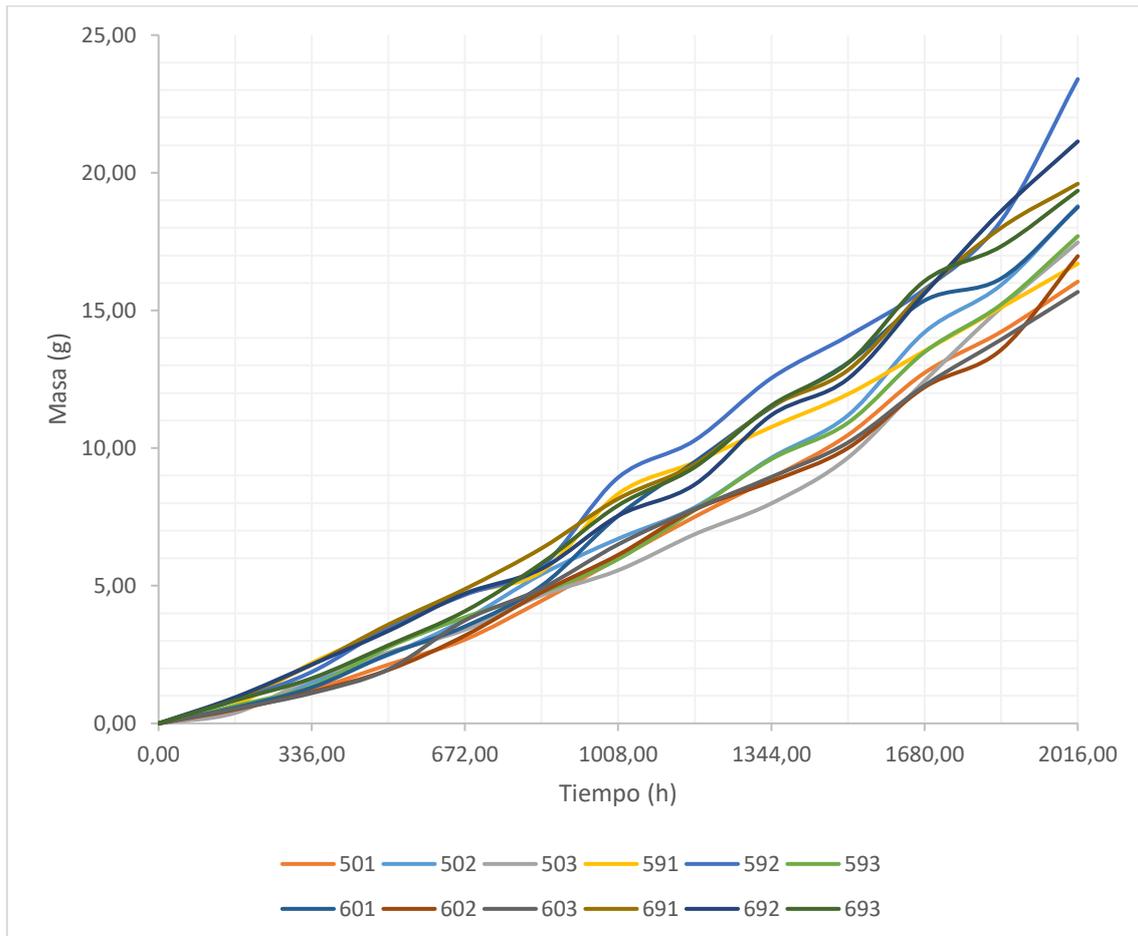


Figura 3-9 Diferencias de masa acumulada

(Fuente: Propia).

La masa de las probetas va disminuyendo notablemente conforme transcurre el tiempo de análisis, la pérdida de masa de las probetas tiende a ser ligeramente lineal, como se puede notar en la Figura 3-6.

3.1.7.4. Velocidad de corrosión

Para el cálculo de la velocidad de corrosión (tasa de corrosión), se considera un tiempo de 2016 horas (12 semanas), con la diferencia de pesos total en este periodo de tiempo,

se utiliza el método descrito en el apartado 2.3.8 del presente trabajo. A continuación, se presenta un ejemplo de cálculo de la velocidad de corrosión para la probeta 501:

Donde:

$$K = 8,76 \times 10^4 \frac{mm}{año}$$

$$T = 2016 [h]$$

$$A = 124,9 [cm^2]$$

$$W_T = 16,04 [gr]$$

$$D = 7,85 \frac{gr}{cm^3}$$

$$CR_{501} = \frac{8,76 \times 10^4 \frac{mm}{año} \times 16,04 gr}{124,95 cm^2 \times 2016 h \times 7,85 \frac{gr}{cm^3}}$$

$$CR_{501} = 0,71075 \frac{mm}{año}$$

En la siguiente Tabla 3-13, se presenta los resultados del cálculo de velocidad de corrosión para todas las probetas analizadas.

Tabla 3-13 Velocidades de corrosión.

Tipo de soldadura	% Carga	Probeta	AREA [cm ²]	W _T [gr]	CR [$\frac{mm}{año}$]	CR [mpy]
SMAW S/P	25	501	124,95	16,04	0,71075	27,9920
	50	502	126,92	18,79	0,81935	32,2689
	80	503	128,74	17,47	0,75117	29,5837
SMAW C/P	25	591	121,34	16,70	0,76165	29,9963
	50	592	131,91	23,40	0,98197	38,6734
	80	593	124,77	17,70	0,78510	30,9200
GTAW S/P	25	601	134,81	18,75	0,76988	30,3206
	50	602	119,03	16,97	0,78919	31,0812
	80	603	126,40	15,67	0,68621	27,0255
GTAW C/P	25	691	143,55	19,60	0,75577	29,7649
	50	692	148,10	21,14	0,79001	31,1133
	80	693	150,37	19,35	0,71217	28,0479
* Se considera un tiempo de 2016 horas y una constante de transformación (k) de $8,76 \times 10^4 \frac{mm}{año}$ y una constante de transformación (k) de $3,45 \times 10^6 mpy$						

(Fuente: Propia).

La grafica de velocidad de corrosión con respecto al tiempo de todas las probetas analizadas se presenta en la Figura 3-10.

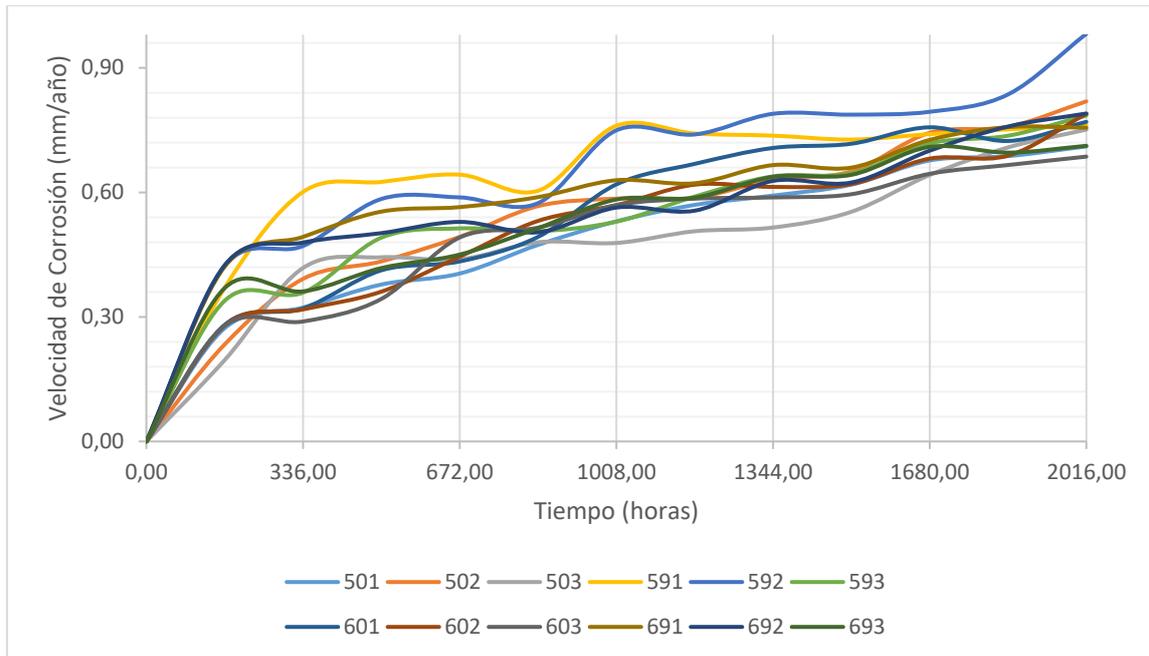


Figura 3-10 Velocidad de Corrosión vs Tiempo de exposición

(Fuente: Propia)

3.1.7.5. Cálculo del espesor mínimo de la tubería y tiempo aproximado de operación.

En base a la velocidad de corrosión se puede determinar el tiempo estimado de funcionalidad de la tubería expuesta a un ambiente corrosivo, para determinar este tiempo, se calculó el espesor mínimo requerido en la tubería para una correcta operación. Para lo cual, se considera que existen tres tipos de utilización de la tubería en el campo petrolero, tubería para revestimiento, tubería para producción y tubería para líneas de transporte: Cada una tiene diferentes aplicaciones por lo cual diferentes requerimientos en cuanto a su uso. En el presente trabajo se analizó una tubería API 5L X52 utilizada para líneas de transporte. Para la inspección de este tipo de tubería se considera la normativa API 570 (Código de inspección de tuberías: inspección en servicio, clasificación, reparación y alteración de los sistemas de tuberías). Sin embargo, para la determinación de los requerimientos de características y propiedades físicas se utilizan las normativas ASME B31.4 (Sistema de transporte por tubería para hidrocarburos líquidos y otros) y ASME B31G (Manual para determinar la resistencia restante de tuberías corroídas).

Para determinar el espesor mínimo (t_{\min}) que debe poseer la tubería se utiliza la ecuación 15, en base a la norma ASME B31.4, 2002.

$$t_{\min} = \frac{P_i D}{2S} + A \quad \text{Ec. 15}$$

Donde:

P_i = Presión interna de trabajo de la tubería [3000 Psi (20 MPa)]; API 5L

D = Diámetro nominal de la tubería [$5 \frac{9}{16}$ pulg. (141,3 mm)]

S = Esfuerzo a la rotura del material

A = Suma de tolerancias por roscado, acanalado y corrosión [0 mm]

Para el cálculo del esfuerzo a la rotura del material (S) se utiliza la ecuación 16, según la norma ASME B31.4, 2002.

$$S = 0,72 * E * S_y \quad \text{Ec. 16}$$

Donde:

0,72 = Factor de diseño basado en el espesor nominal de la pared

E = Factor de unión soldada [1]; ASME B31.4

S_y = Resistencia mínima a la fluencia [359 MPa]; API 5L

$$S = 0,72 * 1 * 359 \text{MPa} = 258,48 \text{MPa}$$

Con el valor de esfuerzo a la rotura del material, se calculó el espesor mínimo requerido para el diseño de la tubería (t_{\min}), utilizando la ecuación 17.

$$t_{\min} = \frac{20 \text{MPa} * 141,3 \text{mm}}{2 * 258,48 \text{MPa}} + 0 \text{mm}$$

$$t_{\min} = 5,46 \text{mm}$$

Se considera un espesor promedio de la tubería analizada de 7,5 mm, con una velocidad promedio de corrosión de 0,776 mm/año, para el cálculo del tiempo aproximado de funcionalidad de la tubería se utiliza la ecuación 17.

$$\text{Tiempo de funcionamiento} = \frac{t_{\text{prom}} - t_{\min}}{C_R} \quad \text{Ec. 17}$$

$$\text{Tiempo de funcionamiento} = \frac{7,5 \text{mm} - 5,46 \text{mm}}{0,766 \frac{\text{mm}}{\text{año}}}$$

$$\text{Tiempo de funcionamiento} = 2,66 \text{ años}$$

Con este cálculo se determina que el tiempo de vida útil de la tubería examinada es de 2,66 años.

3.1.7.6. Análisis estadístico

De la ecuación para el cálculo de velocidad de corrosión (Ec. 12), se puede determinar que esta es directamente proporcional a la diferencia de masa que presentan las probetas en el proceso de corrosión acelerada (Ec. 18).

$$C_R \propto W_T \quad \text{Ec. 18}$$

Por lo cual, comparar las diferencias de masas entre procesos de soldadura es similar que comparar las velocidades de corrosión. Esta comparación permite determinar qué proceso de soldadura mitiga la corrosión.

Se emplea un análisis estadístico ANOVA de los datos calculados, las comparaciones se realizan para cada porcentaje de carga aplicada a las probetas (25%, 50%, 80%), considerando como factor de análisis comparativo los tipos de soldadura (SMAW, GTAW) con sus diferentes variaciones (sin precalentamiento, con precalentamiento) y como variable dependiente cuantitativa la velocidad de corrosión de cada probeta analizada.

En la Tabla 3-14. se presenta los resultados obtenidos del análisis estadístico, realizado en el software SPSS, considerando un nivel de significancia del 5%.

Tabla 3-14 Resultado del proceso ANOVA

Carga Aplicada	Valor de significancia
25 %	0,556
50 %	0,507
80 %	0,707

(Fuente: SPSS)

Según los análisis ANOVA realizados, al comprar las velocidades de corrosión de cada proceso de soldadura con cada porcentaje de carga aplicada; no se obtienen valores significantes menores a 0,05.

3.2. Discusión

3.2.1. Caracterización mecánica del material base

En la Figura 3-11 y en la Tabla 3-15 se comparan los resultados de los ensayos de tracción realizados a las probetas de material base, Tabla 3-1, con los requerimientos

mínimos de la norma API 5L, dentro de la clasificación PSL 1, para la tubería API 5L X52, mostrados en el ANEXO1.

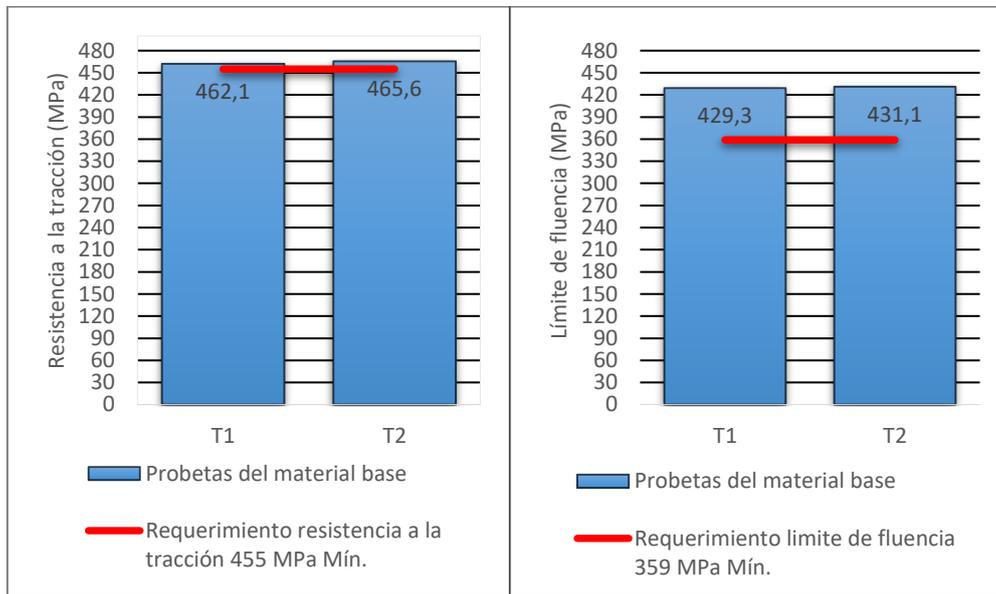


Figura 3-11 Comparación de la resistencia a la tracción del material base (izquierda). Comparación del límite de fluencia del material base (derecha), con respecto a la normativa.

(Fuente: Propia).

Tomando como referencia los requerimientos mínimos, se tiene que: la probeta T1 tiene un incremento del 19,58% del límite de fluencia y un incremento del 1,56% de resistencia a la tracción; la probeta T2 tiene un incremento del 20,8% del límite de fluencia y un incremento del 2,23% de resistencia a la tracción. Por lo cual, el material por sus propiedades mecánicas encaja en la nominación de tubería API 5L X52, PSL1.

Tabla 3-15 Comparación del límite de fluencia y resistencia a la tracción con respecto a la normativa API 5L.

Valores dados por:	Límite de fluencia		Resistencia a la tracción		Observación
	Psi	Mpa	Psi	Mpa	
API 5L (valores mínimos para API 5L x52)	52000	359	66000	455	Requerimiento
Probetas ensayadas					
Probeta T1	62300	429,3	67000	462,1	Si cumple
Probeta T2	62500	431,1	67500	465,6	Si cumple

(Fuente: Propia).

3.2.2. Caracterización química del material base

En la Figura 3-12 y Tabla 3-16, se comparan los resultados de la Tabla 3-2, con los requerimientos químicos de la norma API 5L, dentro de la clasificación PSL1, para la tubería API 5L X52, mostrados en el ANEXO 1.

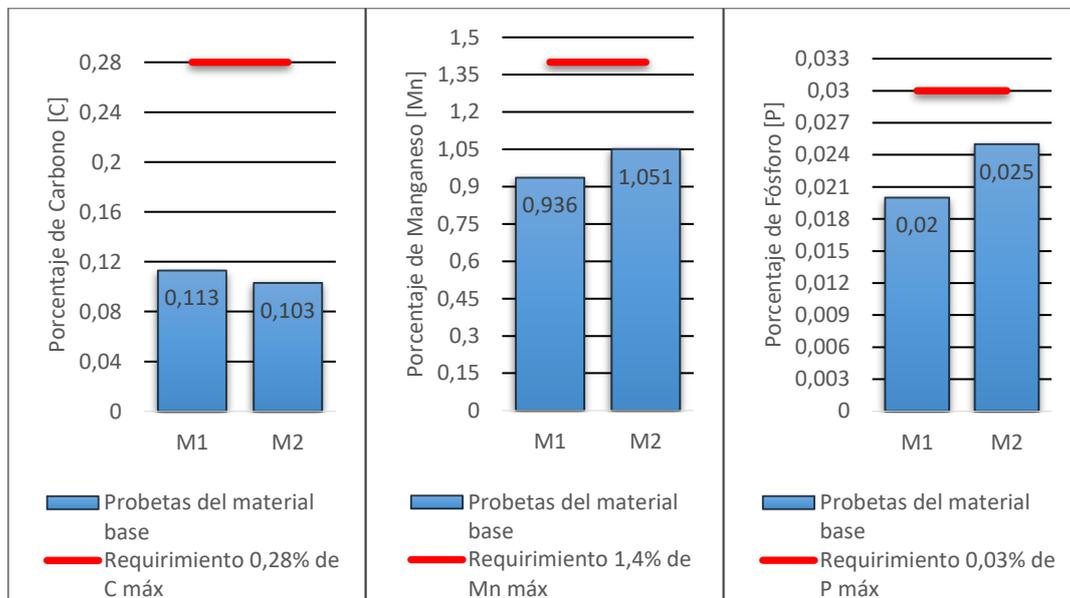


Figura 3-12 Comparación de la composición química del porcentaje de C (izquierda), porcentaje de Mn (centro) y porcentaje de P (derecha), del material base con respecto a la normativa.

(Fuente: Propia).

Las muestras ensayadas (M1, M2) presentan valores menores a los límites máximos que establece la normativa API 5L, para el carbono, manganeso y fósforo, como se puede ver la Figura 3-12. Tomando como referencia los límites máximos para cada componente químico se tiene que: la muestra M1 es menor en un 59,64% en carbono, 33,14% en manganeso y 33,33% en fósforo; la muestra M2 es menor en un 63,21% en carbono, 24,92% en manganeso y 16,66% en fósforo. Debido a que todos los valores obtenidos en la composición química de los diferentes elementos que componen el material base son menores a los requerimientos máximos de la normativa API 5L, para una tubería API 5L X52, PSL1, se determinó que la tubería analizada cumple en esa denominación.

Tabla 3-16 Comparación de la composición química con respecto a la normativa API 5L.

Valores dados por:	Carbono [C]	Manganeso [Mn]	Fósforo [P]	Observaciones
API 5L (Valores máximos para X52)	0,28	1,40	0,030	Requerimientos
Probetas ensayadas				
Muestra M1	0,113	0,936	0,020	Si cumple
Muestra M2	0,103	1,051	0,025	Si cumple

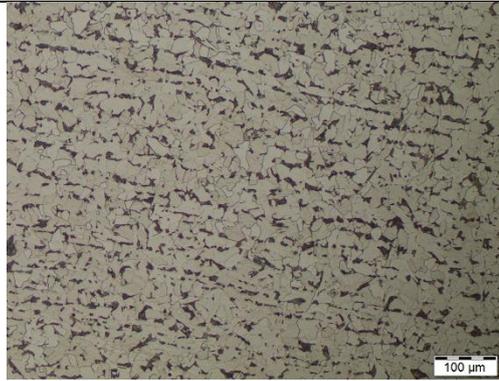
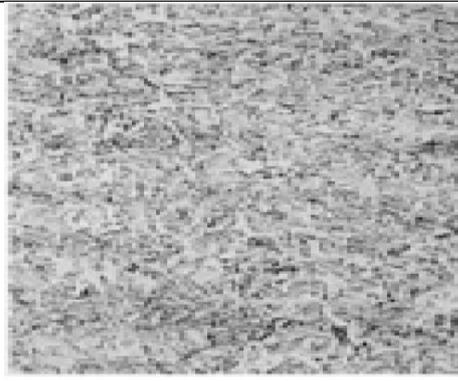
(Fuente: Propia).

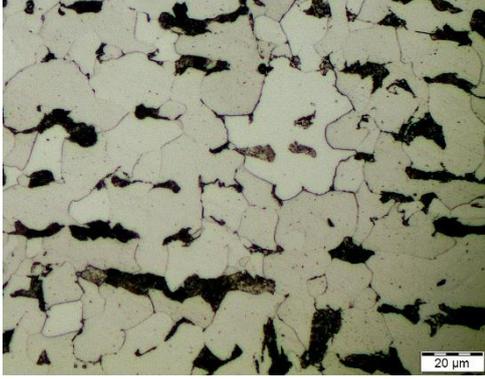
3.2.3. Caracterización metalográfica del material base

La tubería API 5L X52 que se utiliza para el presente estudio es una tubería sin costura, fabricada con un proceso de laminado en caliente. Esto lleva a que el material presente una microestructura ferrítico-perlítica bandeada.

En la Tabla 3-3 se muestran los resultados de la metalografía realizada al material base, estos resultados presentan una clara matriz ferrítico-perlítica, algunas metalografías se comparan con la caracterización presentada por ASM HANDBOOK Volumen 9, 2014, esta comparación se presenta en la Tabla 3-17.

Tabla 3-17 Comparación de la microestructura de la tubería.

Muestra analizada	Referencia ASM Handbook
	
<p>Micrografía mostrando el resultado del análisis microestructural de una muestra transversal de una tubería API 5L x52 PSL1, se observa una matriz ferrítico-perlítica.</p> <p>Ataque químico: Nital 10%</p> <p>Aumento:100X</p>	<p>Micrografía mostrando la microestructura típica de una tubería de acero laminado sin costura API 5L, Grado X52. La microestructura consiste en pequeñas colonias de perlita en una matriz de ferrita.</p> <p>Ataque químico: Picral</p> <p>Aumento: 500X</p>

	
<p>Micrografía mostrando el resultado del análisis microestructural de la muestra de una tubería API 5L x52 PSL1, se presencia colonias de perlita en una matriz de ferrita. Existe un mayor porcentaje de ferrita.</p> <p>Ataque químico: Nital 10%</p> <p>Aumento:500X</p>	<p>Micrografía mostrando la microestructura típica de una tubería de acero laminado sin costura API 5L, Grado X52, soldada por arco doble sumergido que muestra colonias de perlita en una matriz de ferrita.</p> <p>Ataque químico: Picral</p> <p>Aumento: 500X</p>

(Fuente: Propia).

La tubería analizada tiene una matriz ferrítico-perlítica, la cual coincide con la microestructura típica de una tubería API 5L X52, por lo cual el material analizado se lo considera dentro de esa denominación.

3.2.4. Ensayo de soldadura

Para validar las soldaduras se realizaron ensayos de tracción, Nick-break, doblado de cara y doblado de raíz, según corresponde a la norma API 1104, 2013. Los ensayos se discuten a continuación.

3.2.4.1. Ensayo de tracción

En la Figura 3-13 se compara los resultados de los ensayos de tracción de la Tabla 3-6, con el requerimiento de la norma API 1104, 2013; con el fin de validar los procesos de soldadura realizados.

Se considera que todas las probetas ensayadas presentaron rotura en el material base, alejados del cordón de soldadura y de la zona afectada por el calor, como se muestra en la Figura 3-3. Según la norma API 1104, 2013, sección 5.6.2.3, si el espécimen presenta una rotura fuera de la soldadura y de la zona afectada por el calor, es decir, en el material base, se aceptará la soldadura si la resistencia a la tracción no es menor al 95% de la resistencia mínima a la tracción del material base. Como podemos ver en la

Figura 3-13, los resultados de los ensayos de tracción de las probetas soldadas son superiores e iguales a la resistencia mínima a la tracción de la tubería API 5L X52, PSL1.

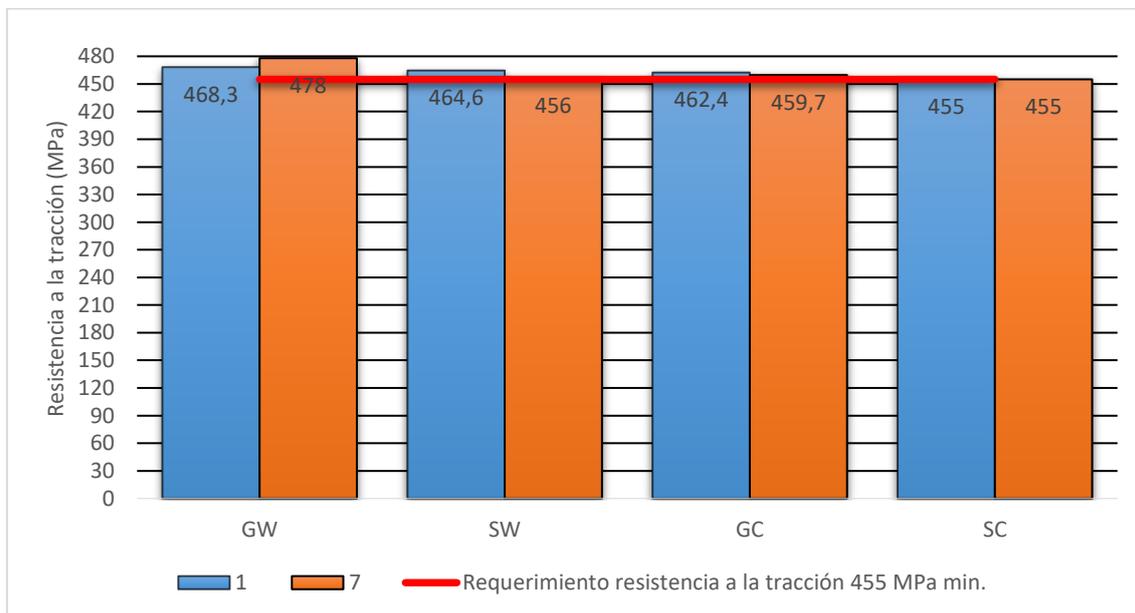


Figura 3-13 Comparación de los resultados del ensayo de tracción de las probetas soldadas con respecto a la norma API 1104.

(Fuente: Propia)

En base a esta comparación se determina una aprobación de todos los procesos de soldadura según el ensayo de tracción realizado.

3.2.4.2. Ensayo de Nick-Break

Este ensayo se realizó a dos probetas por cada tipo de soldadura, los resultados se presentan en la Tabla 3-7. De las ocho probetas analizadas, existen tres probetas con defectos; en las probetas soldadas con el proceso GTAW con precalentamiento y SMAW con precalentamiento presentan un poro cada una, dichos poros miden 0,41 mm. y 0,84 mm. respectivamente, mientras que la probeta soldada con el proceso SMAW sin precalentamiento presenta una inclusión de escoria, cuyas dimensiones son: 0,72 mm. x 1,2 mm. (profundidad x longitud). De acuerdo con la sección 5.6.3.3 de la norma API 1104, 2013, establece que no deben existir porosidades mayores a 1,6 mm., y las inclusiones de escoria no deben ser mayores a 0,8mm. de profundidad y 3 mm. de longitud. En la Tabla 3-18, se presenta la comparación entre los resultados obtenidos en el ensayo y los requerimientos aplicables de la norma según cada caso.

Tabla 3-18 Comparación de los resultados del ensayo de Nick-Break con respecto a los requerimientos de la norma API 1104.

ID PROBETA	OBSERVACION	REQUERIMIENTO API 1104 (2013)	APROBACIÓN
GW2	No se observa indicaciones abiertas.	NA	Si cumple
GW8	No se observa indicaciones abiertas.	NA	Si cumple
SW2	No se observa indicaciones abiertas.	NA	Si cumple
SW8	Escoria:0,72 mm. x 1,2 mm. (profundidad x longitud)	Escoria: profundidad ≤ 0,82mm; longitud ≤ 3mm	Si cumple
GC2	No se observa indicaciones abiertas.	NA	Si cumple
GC8	Poros: 0,41mm	Poros ≤ 1,6mm	Si cumple
SC2	Poros: 0,84mm	Poros ≤ 1,6mm	Si cumple
SC8	No se observa indicaciones abiertas.	NA	Si cumple

(Fuente: Propia).

En base a esta comparación se determina una aprobación de todos los procesos de soldadura según el ensayo de Nick-Break realizado.

3.2.4.3. Doblado de cara y raíz

El ensayo de doblado de cara se realizó a dos probetas por cada tipo de soldadura, al igual que el ensayo de doblado de raíz. Los resultados se presentan en la Tabla 3-8 y 3-9, respectivamente. En la Tabla 3-19, se comparan los resultados de los ensayos en base a la normativa API 1104, 2013, sección 5.6.4.3, según corresponda.

Las probetas ensayadas bajo este procedimiento no muestran ningún tipo de discontinuidad, mucho menos alguna fisura.

Tabla 3-19 Comparación de los resultados del ensayo de doblado de cara y raíz, con respecto a los requerimientos de la norma API 1104.

Id probeta	Observación	Requerimiento API 1104 (2013)	Aprobación Parcial
DOBLADO DE CARA			
GW 4	No se observa indicaciones abiertas.	NA	Si cumple
GW 10	No se observa indicaciones abiertas.	NA	Si cumple
SW 4	No se observa indicaciones abiertas.	NA	Si cumple
SW 10	No se observa indicaciones abiertas.	NA	Si cumple
GC 4	No se observa indicaciones abiertas.	NA	Si cumple
GC 10	No se observa indicaciones abiertas.	NA	Si cumple
SC 4	No se observa indicaciones abiertas.	NA	Si cumple
SC 10	No se observa indicaciones abiertas.	NA	Si cumple

DOBLADO DE RAIZ			
GW 5	No se observa indicaciones abiertas.	NA	Si cumple
GW 11	No se observa indicaciones abiertas.	NA	Si cumple
SW 5	No se observa indicaciones abiertas.	NA	Si cumple
SW 11	No se observa indicaciones abiertas.	NA	Si cumple
GC 5	No se observa indicaciones abiertas.	NA	Si cumple
GC 11	No se observa indicaciones abiertas.	NA	Si cumple
SC 5	No se observa indicaciones abiertas.	NA	Si cumple
SC 11	No se observa indicaciones abiertas.	NA	Si cumple

(Fuente: Propia).

En base a esta comparación se determina una aprobación de todos los procesos de soldadura según el ensayo de doblado de cara y doblado de raíz realizado.

3.2.4.4. Aprobación de las soldaduras

Según la normativa API 1104, 2013, para la aprobación de las soldaduras en la tubería de análisis, se debe aplicar ensayos de tracción, Nick-break, doblado de cara y doblado de raíz. El resumen de la aprobación de todos los resultados de los ensayos de soldadura y la aprobación final se presentan en la Tabla 3-20.

Tabla 3-20 Aprobación de las soldaduras

		Aprobación por cada ensayo								Aprobación de soldadura
		Ensayos								
		Tracción		Nick-Break		Doblado de Cara		Doblado de Raíz		
Soldadura	ID	1	7	2	8	4	10	5	11	
GTAW S/P	GW	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
SMAW S/P	SW	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
GTAW C/P	GC	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
SMAW C/P	SC	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si

(Fuente: Propia).

Las soldaduras realizadas en la tubería API 5L X52, según la norma API 1104, presentan un nivel de aprobación.

3.2.5. Ensayo de corrosión

3.2.5.1. Evaluación visual por macrografías

En la Figura 3-14 se compara dos macrografías la probeta 603, donde, posterior al ensayo de corrosión, se observa una gran pérdida de brillo y acabado en la superficie, también, concentraciones de porosidades tanto en el material base como en el cordón

de soldadura, todo esto debido a que el fenómeno corrosivo produce el desprendimiento de material, desgastándolo y lógicamente disminuyendo su espesor. Una característica que se presentó en todas las probetas y como se lo puede evidenciar en el ANEXO VIII es que en el cambio de sección entre el material base y el cordón de soldadura se deposita una cantidad considerable de material producto de la corrosión, mismo que al no poder ser removida en las limpiezas debido a su ubicación, va afectando esta zona, donde se considera que existe mayor efecto corrosivo, mismo que se lo podrá analizar posteriormente mediante el análisis visual en las micrografías realizadas.



a) Macrografía antes de proceso de corrosión.

b) Macrografía después de 2016 horas de ensayo.

Figura 3-14 Macrografías probeta 603 antes y después del ensayo de corrosión
(Fuente: Propia)

3.2.5.2. Evaluación visual por micrografías

Para realizar el análisis micrográfico se consideró una probeta de cada tipo de soldadura realizada, es decir una de GTAW y una de SMAW. En el proceso de soldadura GTAW se presentan las micrografías mostradas en la Figura 3-15.

Al analizar la Figura 3-15 a); donde se muestra el material base de la probeta 692 expuesta a corrosión, se puede visualizar una leve afectación de la corrosión por picadura, comparada con las otras zonas mostradas. La microestructura no ha sufrido cambios a pesar de ser precalentada, cuya temperatura llegó a los 160°C aproximadamente. (Lippold J,2015) indica que al ser este valor mucho menor a los 727°C; temperatura a partir la cual se generan cambios de microestructura, no existe ningún tipo de transformación microestructural del material. Por lo cual se observa la misma microestructura en todo el material base.

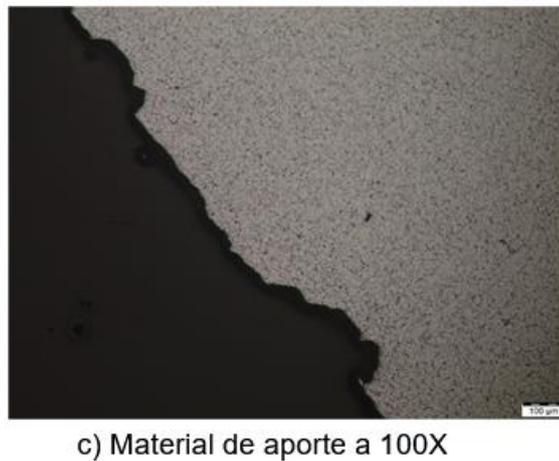
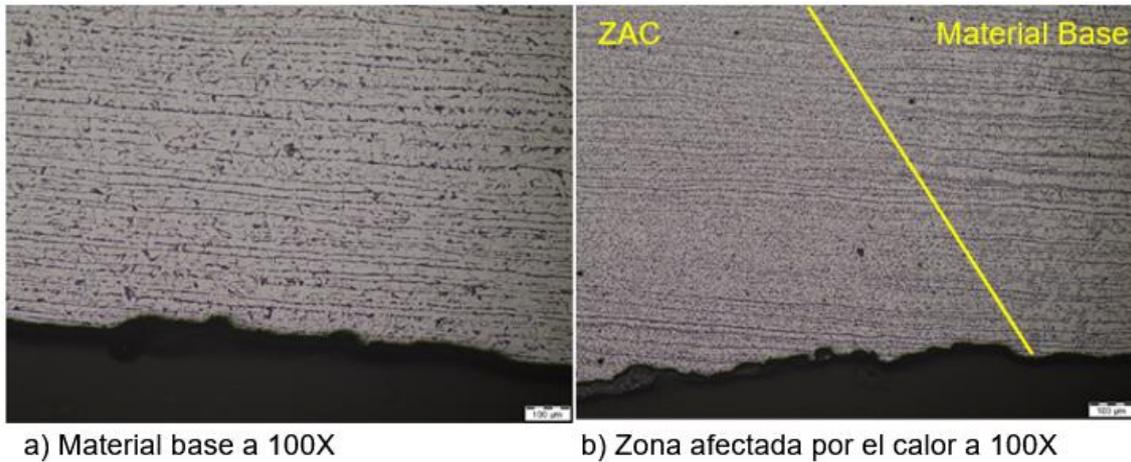
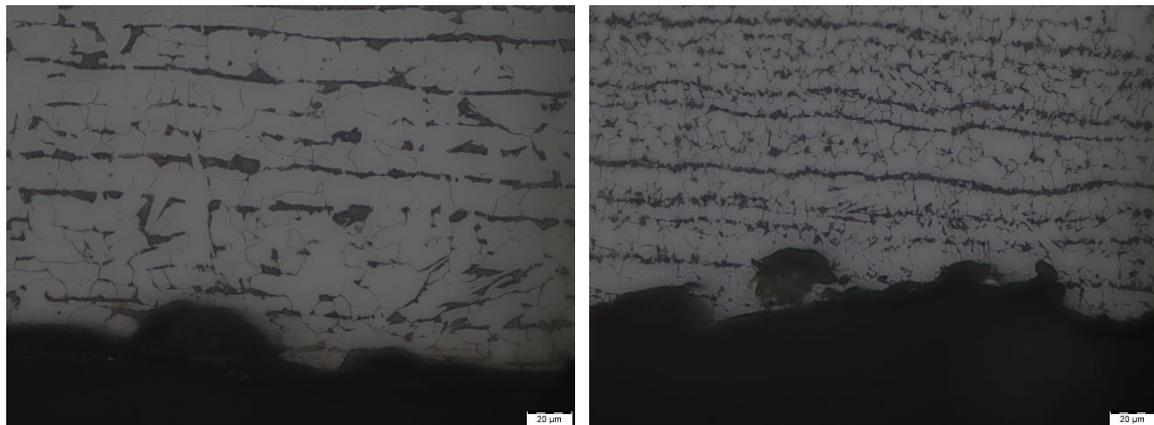


Figura 3-15 Micrografías probeta 692 con ataque de picral al 3%.

(Fuente: Propia).

La parte b) de la misma figura (Figura 3-15) muestra la zona afectada por el calor en la parte izquierda y a la derecha de la imagen se aprecia el material base, las dos microestructuras con una notable diferencia en el tamaño de grano tanto de la ferrita, así como de la perlita, mostrándose esta última de forma más desordenada, sin embargo, la microestructura es la misma, ya que en la ZAC se registró una temperatura máxima de 710°C, aproximadamente, y, no llegó a la temperatura de austenización, según (Azeddine, 2012) es el motivo por el cual se observa esa notable reducción de tamaño de grano.

Debido al aumento de perlita en la microestructura, se evidencia un aumento de dureza en la ZAC del 3% en relación con el material base, tal como se indica en la Tabla 3-10. En la Figura 3-16 se observa las dos microestructuras nombradas con anterioridad a un aumento de 500X.



a) Material base a 500x

b) Zona afectada por el calor a 500x



c) Material de aporte a 500x

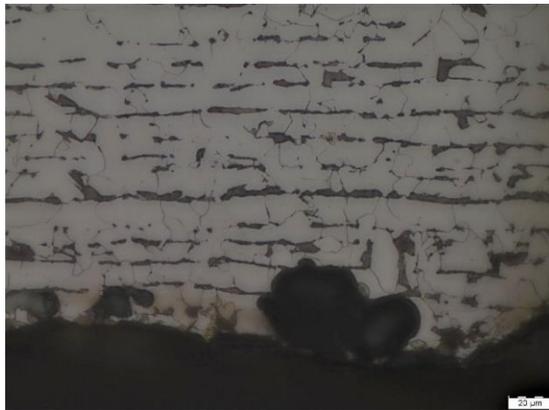
Figura 3-16: Micrografía de zonas probeta 692 a 500X con ataque de picral al 3%.

(Fuente: Propia).

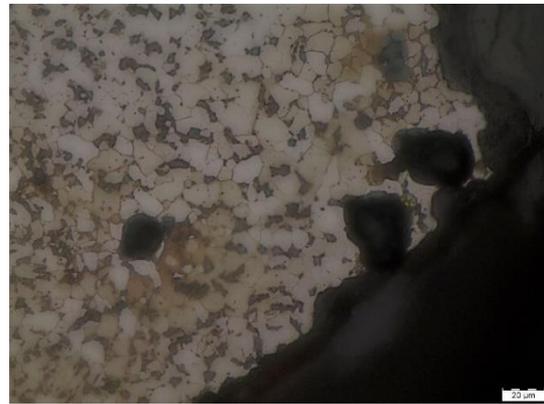
Mientras tanto, la microestructura del material de aporte (Figura 3-16c) corresponde a la de un acero de extra bajo carbono del 0,06%C, esto de acuerdo con el estudio realizado por (Va Larre, 2010). Este porcentaje de carbono evidenciado está dentro del rango de especificaciones dado por el fabricante para este tipo de electrodo (ANEXO IV). Adicionalmente, la medida de dureza en esta misma zona corresponde al valor de 80 HRB, valor muy cercano al que indica el fabricante (90HRB); esta disminución de dureza es debido a que en la micrografía de la probeta en análisis encontramos un bajo porcentaje de perlita, misma que se caracteriza por su alta dureza, pero baja tenacidad y se la observa como la parte más oscura de la micrografía.

De igual manera se realizó el análisis en la probeta 503, misma que representa a las probetas soldadas mediante proceso SMAW.

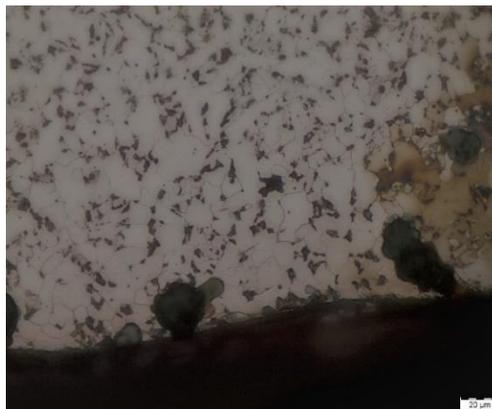
La soldadura al ser realizada en el mismo material base no presenta diferencias micrográficas con respecto a las otras soldaduras, por lo cual se enfatizó el análisis de la ZAC y el material de aporte.



a) Material base a 500x



b) Zona afectada por el calor a 500x



c) Material de aporte a 500x

Figura 3-17: Micrografía por zonas probeta 503 a 500X con ataque de picral al 3%.

(Fuente: Propia).

La ZAC (Figura 3-17b) registra una matriz ferrítica con presencia de perlita; la cual está compuesta de ferrita (parte clara) y cementita (puntos oscuros). Siendo la ferrita la fase con ligera superioridad de cantidad en esta zona. La dispersión y reducción del tamaño de grano tanto de la ferrita como de la perlita se debe al aumento de temperatura que sufre el material en la ZAC, sin embargo, el tamaño de perlita es mayor que en el proceso analizado anteriormente, esto debido a que la temperatura que alcanzó en esta zona fue de 680°C, aproximadamente, y esta fue menor que la registrada en el proceso GTAW.

La micrografía del material de aporte de esta probeta mostrada en la Figura 3-17 c), revela nuevamente una matriz ferrítica con una leve presencia de perlita. Al compararla

con la Figura 3-16 c) y teniendo en cuenta los porcentajes de carbono de cada uno de los materiales de aporte: 0,05-0,09%C en material de aporte para SMAW y 0,05-0,15%C en material de aporte para GTAW (ANEXO IX); se puede observar un considerable aumento en el contenido de perlita para la probeta soldada mediante proceso GTAW, debido a que el material de aporte seleccionado para este proceso contiene mayor contenido de carbono.

Al relacionar la microestructura con el proceso de corrosión, (Quiroz, 2009) menciona que: “La perlita, o más específicamente la cementita, presenta un comportamiento catódico frente a la ferrita”. Es decir, la perlita está constituida por cementita y ferrita, las cuales, al estar en un proceso electroquímico, se comportan como cátodo y ánodo respectivamente. El producto de esta corrosión hace que la perlita actúe anódicamente en una matriz ferrítico-perlítica.

Es por esto que la zona afectada por el calor tanto del proceso SMAW como del proceso GTAW poseen una mayor corrosión, debido al gran porcentaje de perlita distribuida en la matriz ferrítica que se muestra en aquellas zonas.

3.2.5.3. Pérdidas de masa

El deterioro del material se ve manifiesto en la reducción de masa de las probetas analizadas. En todas las probetas existe una variación de masa debido al proceso de corrosión acelerada a las cuales fueron sometidas, esta disminución de masa para cada probeta tiene una tendencia aparentemente lineal, como se muestra en la Figura 3-5.

La pérdida de masa tiene relación directa con la disminución del espesor de las probetas analizadas. En la Tabla 3-21, se muestra la diferencia de espesor que tuvo cada probeta desde el inicio hasta el final del proceso de corrosión a la que fueron sometidas. Las probetas con mayor diferencia de espesor corresponden a aquellas que presentaron mayor pérdida de masa.

Tabla 3-21 Diferencia de espesores.

SMAW				GTAW			
Sin precalentamiento		Con precalentamiento		Sin precalentamiento		Con precalentamiento	
Probetas	Diferencia de espesores [mm]						
501	0,225	591	0,15	601	0,4	691	0,6
502	0,725	592	0,55	602	0,7	692	0,975
503	0,525	593	0,45	603	0,325	693	0,325

(Fuente: Propia).

Según (Campbell, 2008), esta pérdida de masa es común en un proceso de corrosión metálica debido a que producen reacciones químicas y electroquímicas donde los átomos de la superficie del metal sólido reaccionan con una sustancia en contacto, produciendo un deterioro del material y sus propiedades. Hay que considerar también que existen distintas zonas de ánodo y cátodo generadas por la falta de homogeneidad dentro del material, acelerando su deterioro. Otros factores son las imperfecciones y discontinuidades causadas por la soldadura.

3.2.5.4. Velocidad de corrosión

Según los resultados presentados en la Tabla 3-13, notamos que las velocidades de corrosión varían de $0,68621 \left[\frac{mm}{año} \right]$ a $0,81935 \left[\frac{mm}{año} \right]$, estas velocidades se comparan con los resultados de (Martines Hernández, 2012) en dicho trabajo presentan la velocidad de corrosión para la tubería API 5L X52, expuesta en un medio salino, generando la corrosión por respuesta electroquímica, las velocidades se presentan en la Tabla 3-22.

Tabla 3-22 Velocidad de corrosión tubería API 5L X52

Voltaje [mV]	Rp [$\Omega * cm^2$]	$i_{corr} \left[\frac{cm}{s} \right]$	$V_{corr} \left[\frac{mm}{año} \right]$
10	441,5365	2,16508E-09	0,682780566
20	440,911	2,16815E-09	0,683749195
30	342,621	2,79015E-09	0,879900944
40	266,8175	3,58284E-09	1,12988294
50	278,3235	3,43472E-09	1,083173147
60	286,7495	3,33378E-09	1,051344611
70	291,2105	3,28272E-09	1,035239256
80	299,1145	3,19598E-09	1,007883407
90	307,276	3,11109E-09	0,981113206

(Fuente: Martínez G., 2012)

Las velocidades de corrosión están en un rango de $0,68278 \left[\frac{mm}{año} \right]$ a $1,12998 \left[\frac{mm}{año} \right]$, siendo muy similares a las velocidades de corrosión que se obtuvieron experimentalmente. Las variaciones se generan por método de corrosión aplicado a las probetas ensayadas.

Según (Campbell F. ,2018) la tasa de corrosión se la podría calificar como excelente, satisfactoria, aceptable e insatisfactoria como muestra la Tabla 3-23.

Por lo cual, según las velocidades de corrosión calculadas, la tubería está dentro de un rango de calificación excelente en todos los procesos de soldadura analizados, ya que las velocidades de corrosión son menores a 2 mm/año.

Tabla 3-23 Calificación de velocidades de corrosión.

Calificación	Velocidad de corrosión	Detalles
Excelente	Tasa menor de $2 \left[\frac{mm}{año} \right]$	Metales adecuados para fabricación de piezas críticas.
Satisfactoria	Tasa de 2 a $20 \left[\frac{mm}{año} \right]$	Metales adecuados para partes no críticas donde se tolera una mayor tasa de corrosión.
Aceptable	Tasa de 20 a $50 \left[\frac{mm}{año} \right]$	Velocidad tolerable para equipos masivos con un generoso margen de corrosión.
Insatisfactoria	Tasa de más de Tasa de $50 \left[\frac{mm}{año} \right]$	Los metales no son aceptados en el medio ambiente.

(Fuente: Campbell, 2008).

Sin embargo, a pesar de tener una velocidad excelente para procesos de fabricación hay que tener en cuenta que la tubería API 5L X52 es mayormente utilizada para sistemas de producción de petróleo, por lo cual según la Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión o por sus siglas en ingles NACE (National Association of Corrosion Engineers), en su publicación RP0775 (Preparation, Installation, Analysis, and Interpretation of Corrosion Coupons in Oilfield Operations), 2005, se establece la siguiente guía de referencia cuantitativa para la interpretación de la corrosión media y las tasas de picadura, esta se muestra en la Tabla 3-24.

Tabla 3-24 Categorización cualitativa de las tasas de corrosión del acero al carbono para los sistemas de producción de petróleo.

Categorización cualitativa de las tasas de corrosión del acero al carbono para los sistemas de producción de petróleo.				
	Tasa de corrosión promedio		Tasa máxima de picaduras	
	mm/y *	mpy**	mm/y	mpy
Baja	<0,025	<1,0	<0,13	<5,0
Moderada	0,025-0,12	1,0-4,9	0,13-0,20	5,0-7,9
Alta	0,13-0,25	5,0-10	0,21-0,38	8,0-15
Severa	>0,25	>10	>0,38	>15
*mm/y = milímetro por año				
**mpy= milésima de pulgada por año				

(Fuente: RP0775, 2005).

En base a esta guía de referencia se podría estimar que la velocidad de corrosión en las probetas analizadas es severa, por lo cual se deben buscar y aplicar procedimientos que ayuden a minimizar la susceptibilidad a la corrosión.

En cuanto a la gráfica que presenta la velocidad de corrosión tiende a estabilizarse en el tiempo, en comparación a la gráfica presentada por NACE en su publicación Curso básico para la corrosión, 2004. La gráfica se asemeja a un tipo de comportamiento de corrosión el cual decrece con el tiempo, como se puede notar en la Figura 3-18.

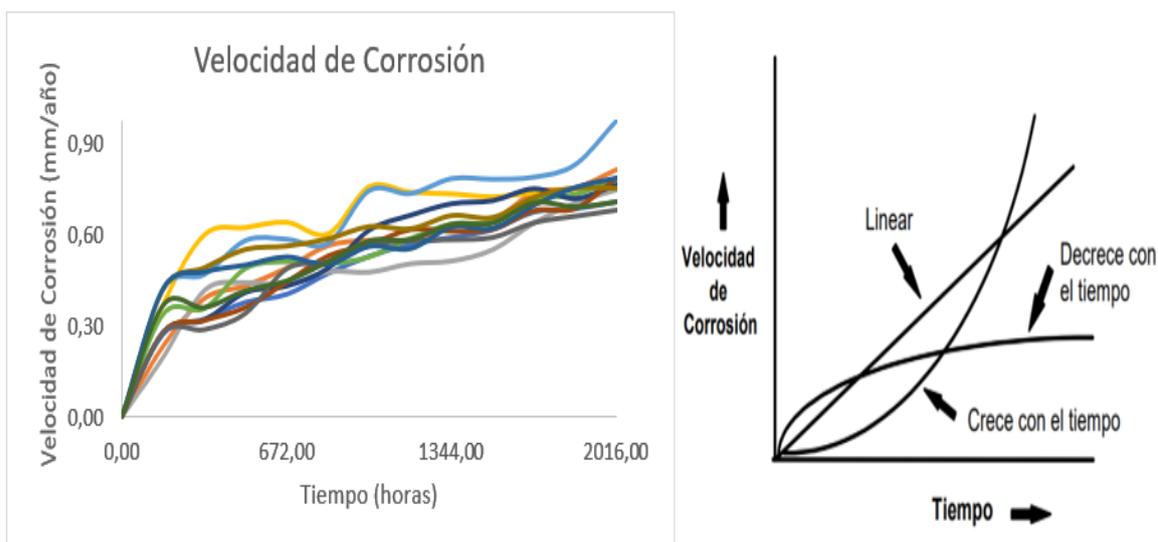


Figura 3-18 Comparación de la tendencia de la velocidad de corrosión.

(Fuente a: Propia, Fuente b: Nace, 2004).

3.2.5.5. Tiempo de operación aproximado

Para el cálculo del tiempo de operación aproximado se consideró el espesor promedio de la tubería analizada de 7,5 mm, el espesor mínimo de operación de 5,46 mm., y la velocidad promedio de corrosión de 0,776 mm/años, con estos datos se determinó que el tiempo aproximado de operación en óptimas condiciones de la tubería es de 2,66 años, como se indica en el apartado 3.1.7.5. Este tiempo es corto, debido a que la tubería que se analizó no poseía algún tipo de protección ante la corrosión y se estimaron parámetros de funcionamiento críticos para el cálculo del espesor mínimo para el funcionamiento de la tubería.

Uno de los parámetros para el cálculo del espesor mínimo de la tubería fue considerar como presión interna de operación, la presión mínima requerida para pruebas hidrostáticas a la tubería según la API 5L.

3.2.5.6. Análisis estadístico.

Según los análisis ANOVA realizados, al comprar las velocidades de corrosión de cada proceso de soldadura en cada porcentaje de carga aplicada no se tienen valores significantes menores a 0,05, por lo cual, las comparaciones entre procesos de soldadura son insignificantes y estadísticamente no existiría variaciones entre ellos al comprar sus velocidades de corrosión, por lo tanto, no tendría gran importancia el seleccionar uno u otro proceso.

Al no encontrar valores de significancia, se procedió a realizar un análisis descriptivo para poder encontrar alguna diferencia matemática que nos permita visualizar de mejor manera el comportamiento de las variables de acuerdo con los diferentes factores.

En la Tabla 3-25 se muestran las velocidades de corrosión de menor magnitud en cada porcentaje de carga y el tipo de soldadura al cual pertenecen.

Tabla 3-25 Velocidades de corrosión menores en cada carga aplicada.

Carga Aplicada	Probeta	Tipo de soldadura	Velocidad de corrosión (CR)
25 %	501	SMAW sin precalentamiento	0,7108 mm/año
50 %	602	GTAW sin precalentamiento	0,7892 mm/año
80 %	603	GTAW sin precalentamiento	0,6862 mm/año

(Fuente: Propia).

Cada porcentaje de carga presenta un proceso de soldadura en el cual se evidencia una menor velocidad de corrosión. Sin embargo, se genera una tendencia al 50% y 80% de carga, ya que el proceso de soldadura que menor corrosión presenta en estos dos casos es GTAW sin precalentamiento.

Con referencia a las velocidades de corrosión calculadas, la máxima variación de velocidad es de 0,1928 mm/año que corresponde a la diferencia entre la máxima velocidad de corrosión obtenida (0,9820 mm/año, SMAW con precalentamiento al 50% de carga) y la mínima velocidad de corrosión obtenida (0,6862 mm/año, GTAW sin precalentamiento al 80% de carga).

Según (Campbell F.,2018), las velocidades de corrosión calculadas en los ensayos no predicen con precisión el rendimiento de un material a largo plazo, debido a que se calcula este parámetro en ensayos de corta duración y condiciones simuladas controladas.

Por lo cual, al no existir una diferencia considerable entre el valor máximo y mínimo de las velocidades de corrosión calculadas, no se podría determinar con exactitud un proceso de soldadura que mitigue la corrosión. También, hay que considerar que el

material base predomina en gran porcentaje en las probetas analizadas por lo cual las velocidades de corrosión reflejan en gran mayoría la velocidad de corrosión de la tubería API 5L X52.

Sin embargo, para minimizar la susceptibilidad a la corrosión, según (Jenney, 2001) se debe tener en cuenta que, la selección de un metal base adecuado y los consumibles de soldadura, contribuyen a reducir los posibles efectos perjudiciales de la corrosión. También se recomienda utilizar técnicas y procedimientos de soldadura que garanticen una penetración completa, una geometría de soldadura suave y ligeramente convexa. Ya que la penetración incompleta o excesiva, porosidad, el craqueo de hidrógeno, etc. son sitios susceptibles de iniciación a la corrosión. Se debe tener cuidado con la escoria o flujos residuales. También tener una correcta limpieza para evitar superficies de grasa, suciedad y otros contaminantes que pueden provocar corrosión.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- En el presente trabajo de investigación se cumplen los objetivos establecidos.
- La tubería utilizada en el presente trabajo de investigación cumplió con los requerimientos mecánicos, químicos y metalográficos, propuestos para una tubería API 5L X52, PSL1.
- Los procesos de soldadura fueron aceptados, al no presentar discontinuidades que estén fuera de los requerimientos en cada uno de los ensayos mecánicos aplicados.
- Los procesos de soldadura con precalentamiento presentan menor dimensión de la ZAC, el proceso SMAW con precalentamiento registró una dimensión de 1,49 mm., siendo la menor entre los cuatro procesos, debido a que el proceso de soldadura SMAW tuvo menor calor de entrada con referencia al proceso GTAW.
- De acuerdo con las macrográficas del proceso SMAW y GTAW; se puede observar que existe una considerable concentración de corrosión en el borde del cordón de soldadura, donde empieza la zona afectada por el calor, esto debido a los cambios de geometría e imperfecciones generadas por la soldadura.
- En las probetas analizadas se produce una corrosión electroquímica superficial, debido a que la perlita está constituida por cementita y ferrita, las cuales, al estar en un proceso electroquímico, se comportan como cátodo y ánodo respectivamente. El producto de esta corrosión hace que la perlita actúe anódicamente en una matriz ferrítico-perlítica
- En las soldaduras realizadas, el material de aporte del proceso SMAW en su microestructura presenta menor cantidad de perlita con respecto al material de aporte del proceso GTAW, por lo cual, la zona del material de aporte del proceso SMAW tiene un menor impacto corrosivo.
- La pérdida de peso en las probetas analizadas fue un efecto del proceso corrosivo que estas experimentaron, ya que estaban expuestas en un medio salino, el cual reaccionó con el metal produciendo un deterioro superficial. La falta de homogeneidad superficial dentro del material también aportó a que existan diferentes zonas de ánodos y cátodos causando un aumento de pérdida de masa. Otros factores fueron las imperfecciones y discontinuidades causadas

por el proceso de soldadura. Esta pérdida de masa se evidenció también en la disminución del espesor de las probetas.

- Las velocidades de corrosión registradas en el presente trabajo están en un rango de $0,68621 \left[\frac{mm}{año} \right]$ a $0,81935 \left[\frac{mm}{año} \right]$, para estos valores la corrosión se calificó como severa. Por lo cual se deben buscar y aplicar procedimientos que ayuden a minimizar la susceptibilidad a la corrosión.
- Al comparar las velocidades de corrosión no existieron mayores diferencias entre los procesos de soldadura, por lo cual, no se pudo determinar con exactitud un procedimiento de soldadura, de las analizadas en este trabajo, que mitigue el proceso de corrosión, considerando también que los ensayos de corrosión no predicen con exactitud el rendimiento del material analizado a largo plazo.

4.2. Recomendaciones

- Realizar la caracterización correspondiente a la tubería (material base) para asegurar que esta cumple con los requerimientos de la denominación al cual pertenece, dentro de la normativa API 5L.
- Para obtener resultados más notables, se recomienda aumentar la severidad del ensayo de corrosión, por ejemplo, realizar un ensayo de corrosión por sumersión.
- Prolongar el tiempo de estudio del ensayo de corrosión también es una buena alternativa para observar un comportamiento más preciso de la soldadura frente a la corrosión.
- Para la limpieza de las probetas corroídas es recomendable utilizar implementos que no desgasten el material base, para tener una mayor eficacia en la limpieza se pueden utilizar sustancias químicas, que estén dentro de las normativas aplicables.
- En el diseño de la cámara de niebla salina para el ensayo de corrosión, debe asegurarse la homogeneidad de rocío sobre todas las probetas analizadas.
- Antes de realizar el análisis de resultados obtenidos en la experimentación, se debería realizar un análisis estadístico básico con la finalidad de eliminar los datos atípicos producidos por posibles errores en el proceso experimental.

Referencias Bibliográficas

- [1] API 5L (2004). Specification for line Pipe. Washinton: American Petroleum Institute.
- [2] API 570 (2009). Piping Inspection Code: In-service Inspection, Rating, Repair, and Alteration of Piping Systems. Washinton: American Petroleum Institute.
- [3] ASM Handbook (2003). Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection. (Vol. 13A)
- [4] ASME B31.4 (2002). Pipeline Transportation Systems for Liquid Hydrocarbons and Other Liquids.
- [5] ASME B31G (1991). Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines. Technical report, ASME.
- [6] ASTM. (2014). Stress Corrosion Testing STP 425. Baltimore: American Society for Testing and Materials.
- [7] ASTM A370-18, Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, www.astm.org
- [8] ASTM B117-16. (2016). Standard Practice for Operation Salt Spray (Fog) Apparatus. West Conshohocken: ASTM International.
- [9] ASTM E8 / E8M-16a, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org
- [10] ASTM E10-18, Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, www.astm.org
- [11] ASTM E178-16a, Standard Practice for Dealing with Outlying Observations, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org
- [12] ASTM E18-19, Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, www.astm.org
- [13] ASTM E634-12, Standard Practice for Sampling of Zinc and Zinc Alloys by Spark Atomic Emission Spectrometry , ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, www.astm.org
- [14] ASTM G16-13(2019), Standard Guide for Applying Statistics to Analysis of Corrosion Data, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, www.astm.org

- [15] ASTM G39-99. (2016). Standard Practice for Preparation and Use of Bent-Bean Stress-Corrosion Test Specimens. West Conshohocken: ASTM International.
- [16] AWS A5.5 (2014). Specification for Low-Alloy Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding.
- [17] AWS A5.12M (2009). Specification for Tungsten and Oxide Dispersed Tungsten electrodes for arc Welding and Cutting.
- [18] AWS A5.18 (2005). Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding.
- [19] Avner, A. (1988). Introducción a la Metalurgia Física. Segunda edición. México: McGraw-Hill Book Co.
- [20] Azeddine, Belalia & Rahmani, A & Lenkey, G.B. & Guy, Pluvinage & Azari, Z. (2012). Dynamic Characterization of API 5L X52 Pipeline Steel. Key Engineering Materials. 498. 15-30. 10.4028/www.scientific.net/KEM.498.15.
- [21] Baboian Robert (2002), Nace Corrosion Engineer's reference book. 3ra. Edición
- [22] Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2008). Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley (Vol. 8). New York: McGraw-Hill.
- [23] Campbell, F. C. (Ed.). (2008). Elements of metallurgy and engineering alloys. ASM International, capítulo 18.
- [24] ECCA (2011). The Basics of Corrosion. Technical Paper. Recuperado de: <http://www.prepaintedmetal.eu/repository/Annina/Basic%20of%20corrosion%20201211.pdf>
- [25] Girden, E. R. (1992). ANOVA: Repeated measures (No. 84). Sage.
- [26] Groover, M. P. (2007). Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas. (3ra ed.) México: McGRAW-HILL/INTERNAMERICANA EDITORES.
- [27] Hidalgo, D., & Lozada, H. (2007). Cálculo y análisis del régimen de soldadura para el proceso SMAW en aceros al carbono y aleados y la implementación del software de aplicación (Tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- [28] H. (2008). Corrosion and Corrosion Control – An Introduction to Corrosion Science and Engineering. Wiley & Sons, Inc: USA.

- [29] Jenney, C. L., & O'Brien, A. (2001). Welding science and technology. Welding Handbook, American Welding Society, Welding Handbook Committee, 1.
- [30] Lippold, J. C. (2015). Welding metallurgy and weldability. John Wiley & Sons Incorporated.
- [31] Martines Hernández, G. F. (2012). Evaluación de la respuesta electroquímica del acero de bajo carbono en un medio salino. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Autónoma de México. México, 2012.
- [32] NACE (2004), Curso de Corrosión Básica, Manual del Estudiante, NACE International
- [33] Núñez, C., Roca, A & Jorba, J (2013). Comportamiento mecánico de los materiales. Barcelona, España: Universidad de Barcelona.
- [34] Quiroz, R., Rosales, A., & Barón, E. (2009). EFECTO DE LA PERLITA EN ACEROS BANDEADOS SOBRE LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN POR CO₂. Revista Latinoamericana De Metalurgia Y Materiales, 2009, 29(2). Recuperado de <http://www.rlmm.org/ojs/index.php/rlmm/article/view/19>
- [35] Revie R. W. (2011). Uhlig's Corrosion Handbook. Wiley & Sons, Inc: USA.
- [36] Revie R. W. y Uhlig H. H. (2008). Corrosion and Corrosion Control – An Introduction to Corrosion Science and Engineering. Wiley & Sons, Inc: USA.
- [37] Ríos Lombardi, G. C. (2006). Estudio de la microestructura de un acero API 5L X42 sobre la resistencia a la corrosión por CO₂ (Tesis de pregrado). Universidad Simón Bolívar. Caracas, 2006.
- [38] RP0775, N. S. (2005). Preparation, installation, analysis, and interpretation of corrosion coupons in oilfield operations. Houston, TX: NACE International.
- [39] SOLDEXA (2016). Manual de Soldadura & Catálogo de productos. (7° Edición). Recuperado de http://www.soldexa.com.pe/soldexa/sp/support/documentation/upload/manual_de_bolsillo.pdf.
- [40] Va Larre Ricardo Oscar. (2010). Facultad regional Rosario. Obtenido de http://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5_anio/metalografia/5-_Estructuras_del_acero_v2.pdf
- [41] Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2008). Manufactura, ingeniería y tecnología. (5ta ed.) México: Pearson Educación.

Anexos

Anexo I. REQUERIMIENTOS QUÍMICOS Y MECÁNICOS DE LA TUBERÍA API 5L

EL siguiente anexo cita de la norma API 5L las diferencias entre tuberías PSL1 y PSL2, también los requerimientos en la composición química y requerimientos mecánicos para la tubería API 5L X52.

Resumen de diferencias entre PSL1 Y PSL2

Parámetro	PSL 1	PSL2
Rango de grado	A25 a X70	B a X80
Rango de tamaño	0,405 a 80	4 ½ a 80
Tipo de final del tubo	Extremo liso y roscado; extremo con agrandamiento de sección; tubo de acoplamiento especial.	Extremo liso
Soldadura de costura	Todos los métodos, soldadura continua limitada para Grado A25	Todos los métodos, excepto soldadura continua y laser.
Soldaduras eléctricas: Frecuencia del soldador	Sin mínimo	100kHz mínimo
Tratamiento térmico de soldaduras eléctricas	Requerimiento para grados > X42	Requerimiento para todos los grados (B a X80)
Composición máx. C para tubos sin costura	0,28% para grados ≥ B	0,24%
Composición máx. C para tubo soldado	0,26% para grados ≥ B	0,22%
Composición máx. P	0,030% para grados ≥ A	0,025%
Composición máx. S	0,030%	0,025%
Carbono equivalente	Solo cuando el comprador especifica SRI8	Máximo requerido para cada grado
Resistencia a la tracción	Ninguna	Máximo para cada grado
UTS, Máximo	Ninguna	Máximo para cada grado
Tenacidad a la fractura	No se requiere	Requerido para todos los grados
Reparación por soldadura de cuerpo	Permitido	Prohibido

de la tubería, placa permitida		
Reparación por soldadura de costuras de soldadura sin material de relleno	Permitido por acuerdo	Prohibido
Certificación	Certificados cuando se especifica por SRI5	Certificado (SRI 5.1) obligatorio
Trazabilidad	Trazable solo hasta que se pasen todas las pruebas, a menos que se especifique en SRI15	Trazable después de la finalización de las pruebas (SRI 5.2) obligatorio.

(Fuente: API 5L, 2004)

Requerimiento químico para PSL1, producto analizado por porcentaje de peso

Grado y Clase	Carbono, Máximo	Manganeso, Máximo	Fósforo		Azufre, Máximo	Titanio, Máximo	Otros
			Min.	Max.			
Tubería sin costura							
A25, CL I	0,21	0,60		0,030	0,030		
A25, CL II	0,21	0,60	0,045	0,080	0,030		
A	0,22	0,90		0,030	0,030		
B	0,28	1,20		0,030	0,030	0,040	b,c,d
X42	0,28	1,30		0,030	0,030	0,040	c,d
X46, X52, X56	0,28	1,40		0,030	0,030	0,040	c,d
X60	0,28	1,40		0,030	0,030	0,040	c,d
X65, X70	0,28	1,40		0,030	0,030	0,060	c,d

Tubería con soldadura							
A25, CL I	0,21	0,60		0,030	0,030		
A25, CL II	0,21	0,60	0,045	0,080	0,030		
A	0,22	0,90		0,030	0,030		
B	0,26	1,20		0,030	0,030	0,040	b,c,d
X42	0,26	1,30		0,030	0,030	0,040	c,d
X46, X52, X56	0,26	1,40		0,030	0,030	0,040	c,d
X60	0,26	1,40		0,030	0,030	0,040	c,d
X65	0,26	1,45		0,030	0,030	0,060	c,d
X70	0,26	1,65		0,030	0,030	0,600	c,d

(Fuente: API 5L, 2004)

Requerimiento químico para PSL2, producto analizado por porcentaje de peso.

Grado	Carbono, Máximo	Manganeso, Máximo	Fósforo, Máximo	Azufre, Máximo	Titanio, Máximo	Otros
Tubería sin costura						
B	0,24	1,20	0,025	0,015	0,04	c, d, e
X42	0,24	1,30	0,025	0,015	0,04	c, d
X46, X52, X56, X60	0,24	1,40	0,025	0,015	0,04	c, d
X65, X70, X80	0,24	1,40	0,025	0,015	0,06	c, d
Tubería con soldadura						
B	0,22	1,20	0,025	0,015	0,04	c, d, e
x42	0,22	1,30	0,025	0,015	0,04	c, d

X46, X52, X56, X60	0,22	1,40	0,025	0,015	0,04	c, d
x60	0,22	1,40	0,025	0,015	0,04	c, d
X65, X70, X80	0,22	1,45	0,025	0,015	0,06	c, d
x70	0,22	1,65	0,025	0,015	0,06	c, d
x80	0,22	1,85	0,025	0,015	0,06	c, d

(Fuente: API 5L, 2004)

Notas para las Tablas de requerimientos químicos para PSL1 y PSL2:

- a) Por cada reducción de 0.01% por debajo del contenido de carbono máximo especificado, se permite un aumento de 0.05% sobre el contenido de manganeso máximo especificado, hasta un máximo de 1.50% para Grados X42 a X52, hasta un máximo de 1.65% para grados superiores a X52, pero inferiores a X70, y hasta 2.00% para Grados X70 y superiores.
- b) La suma de niobio y vanadio no excederá del 0,03%, salvo que, por acuerdo entre el comprador y el fabricante, se podrá establecer un máximo alternativo.
- c) Niobio, vanadio o combinaciones de los mismos se pueden usar a discreción del fabricante.
- d) La suma de los contenidos de niobio, vanadio y titanio no debe exceder el 0,15%

Requerimientos de tracción para PSL1

Grado	Límite de fluencia mínimo		Resistencia a la tracción, mínima		Elongación, porcentaje mínimo en 2 pulg.
	Psi	Mpa	Psi	Mpa	
A25	25 000	172	45 000	310	a
A25	30 000	207	48 000	331	a
B	35 000	241	60 000	414	a
X42	42 000	290	60 000	414	a
X46	46 000	317	63 000	434	a

X52	52 000	359	66 000	455	a
X56	56 000	386	71 000	490	a
X60	60 000	414	75.000	517	a
X65	65 000	448	77.000	531	a
X70	70 000	483	82.000	565	a

(Fuente: API 5L, 2004)

Requerimientos de tracción para PSL2

Grado	Límite de fluencia mínimo		Límite de fluencia máximo		Resistencia a la tracción, mínima		Resistencia a la tracción, máxima		Elongación, porcentaje mínimo en 2 pulg.
	Psi	Mpa	Psi	Mpa	Psi	Mpa	Psi	Mpa	
B	35 000	241	65 000	448	60 000	414	110 000	758	a
X42	42 000	290	72 000	496	60 000	414	110 000	758	a
X46	46 000	317	76 000	524	63 000	434	110 000	758	a
X52	52 000	359	77 000	531	66 000	455	110 000	758	a
X56	56 000	386	79 000	544	71 000	490	110 000	758	a
X60	60 000	414	82 000	565	75 000	517	110 000	758	a
X65	65 000	448	87 000	600	77 000	531	110 000	758	a
X70	70 000	483	90 000	621	82 000	565	110 000	758	a
X80	80 000	552	100 000	690	90 000	621	120 000	827	a

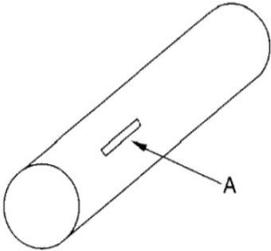
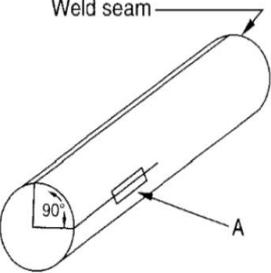
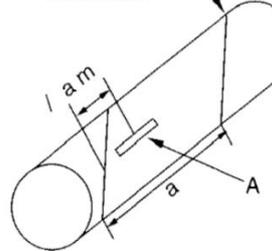
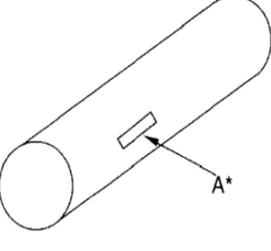
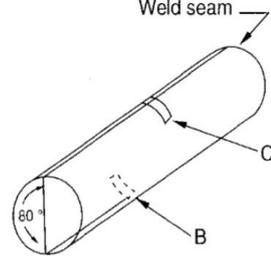
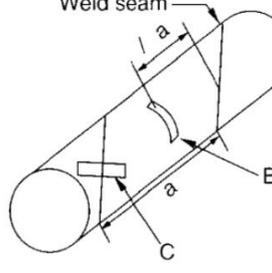
(Fuente: API 5L, 2004)

Anexo II.

**ORIENTACIÓN DE LAS PROBETAS PARA ENSAYOS DE
TRACCIÓN, Y DIMENSIONES DE LA PROBETA SEGÚN LA API
5L**

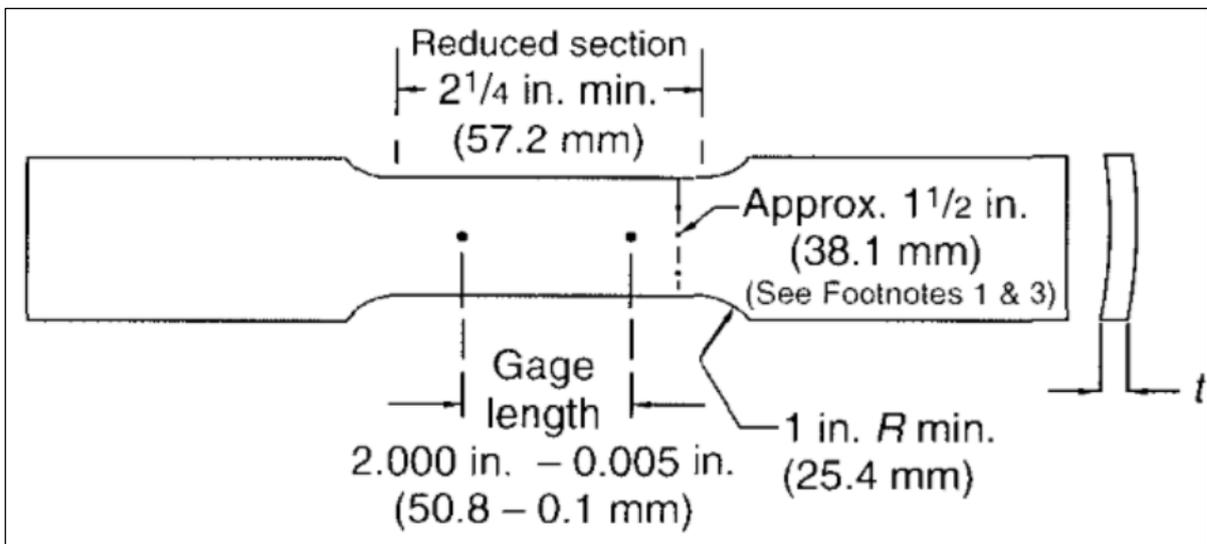
EL siguiente anexo cita de la norma API 5L las diferentes orientaciones para ensayos de tracción y dimensiones de la probeta a utilizarse, los cuales sirven para caracterizar el material.

Orientación de la probeta para ensayos de tracción

Diámetro	Tubería sin costura	Tubería con soldadura	
		Costura longitudinal	Costura helicoidal
$< 8 \frac{5}{8}$			
$\geq 8 \frac{5}{8}$			

(Fuente: API 5L, 2004)

Dimensionamiento de probeta

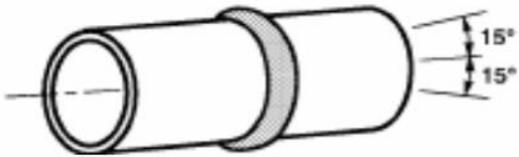
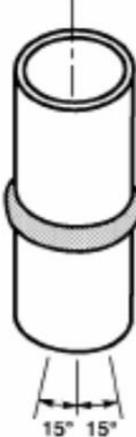
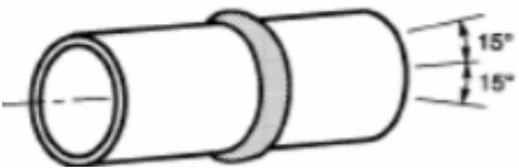
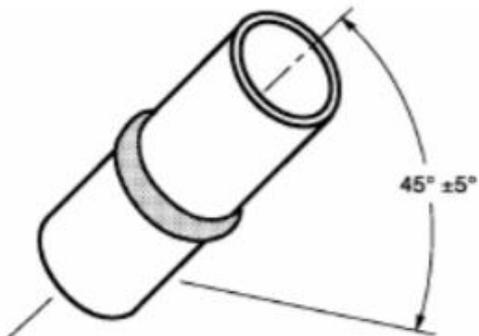


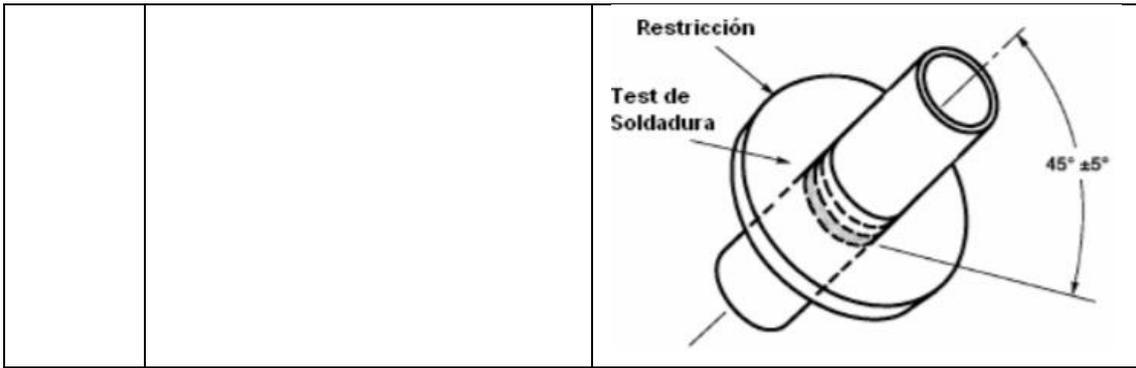
(Fuente: API 5L, 2004)

Anexo III.
POSICIONES PARA SOLDADURA EN TUBERÍA

El siguiente anexo cita de la norma AWS D1.1 las diferentes posiciones para la soldadura de tubería.

Posiciones de soldadura en tuberías

Posición		Grafica
1G	Soldadura plana rotada, tubería horizontal y rotada.	
2G	Soldadura horizontal, tubería vertical y no rotada durante la soldadura.	
5G	Soldadura múltiple, tubería vertical fija y no rotada durante la soldadura. Soldadura plana, vertical, sobre cabeza, segmento de restricción.	
6G	Soldadura múltiple, tubería fija y no rotada durante la soldadura.	
6GR	Soldadura múltiple 6GR con segmento de restricción (conexiones en T, Y y K).	



Fuente: API 5L, 2015

Anexo IV.

Datos técnicos del electrodo E7010 y alambre ER70S-6

El siguiente anexo presenta las características químicas, mecánicas y recomendaciones de uso para el electrodo E7010 y alambre ER70S-6, según su respectivo fabricante OERLIKON y LINCON.

Por sus especiales características y soldabilidad difiere del CELLOCORD 70 en que se puede soldar tuberías en posición vertical descendente.

Excelente electrodo para segunda pasada o pase en caliente "hot pass" en la soldadura de tuberías a presión, ya que la potente acción del arco permite borrar todas las marcas "wagon track" y la escoria del primer pase.

También su uso es ideal para la soldadura en los pases de relleno y acabado de tuberías.

Clasificación

AWS A5.5 / ASME-SFA 5.5	E7010-A1
-------------------------	----------

Análisis Químico de Metal Depositado (valores típicos) [%]

C	Mn	Si	P	S	Mo	Ni	Cr	Cu	Otros
0,05 0,09	0,42 0,70	máx. 0,30	máx. 0,025	máx. 0,025	0,45	-	-	-	-

Propiedades Mecánicas del Metal Depositado

Tratamiento Térmico	Resistencia a la Tracción [MPa (psi)]	Límite de Fluencia [MPa (psi)]	Elongación en 2" [%]	Energía Absorbida ISO-V (+20°C) [J]
Sin Tratamiento	520 - 550 (75 400 - 79 750)	mín. 400 (58 000)	mín. 23	mín. 80

Conservación del Producto

- Mantener en un lugar seco y evitar humedad.
- No requiere almacenamiento bajo horno.

Posiciones de Soldadura

P, H, Va, Sc, Vd.



Parámetros de Soldeo Recomendados

Para corriente continua (DC): Electrodo al polo positivo DCEP				
Diámetro	[mm]	3,25	4,00	5,00
	[pulgadas]	1/8	5/32	3/16
Amperaje mínimo		80	100	140
Amperaje máximo		120	150	200

Aplicaciones

- Para tuberías de acero al molibdeno (0,5% Mo).
- Aceros de baja aleación con menos de 0,3% de carbono.
- Para tuberías de aceros API 5L X42, X46, X52 (pases de caliente, relleno y acabado).

Nota: El precalentamiento está en función al tipo y espesor del material a soldar.

LINCOLN® ER70S-6

Mild Steel, Copper Coated ▪ AWS ER70S-6

KEY FEATURES

- High levels of manganese and silicon deoxidizers tolerate medium to heavy mill scale surfaces
- More puddle fluidity
- Excellent wetting action
- Ink jet printing identification on entire length of electrode
- Q2 Lot® - Certificates showing actual wire chemistry available online

WELDING POSITIONS

All

CONFORMANCES

AWS A5.18/A5.18M:	ER70S-6
ASME SFA-A5.18:	ER70S-6
CSA W48 CLASSIFICATION	B-G 49A 3 CG6 (ER495-6)

TYPICAL APPLICATIONS

- Repairs on a variety of mild and low alloy steel
- Small diameter pipe and tubing
- Sheet metal applications
- Root pass pipe welding

DIAMETERS / PACKAGING

Diameter in (mm)	5 lb (2.3 kg) Plastic Tube 20 lb (9.1 kg) Master Carton	10 lb (4.5 kg) Plastic Tube 30 lb (13.6 kg) Master Carton	50 lb (22.7 kg) Carton
1/16 (1.6)	ED034334	ED034337	ED034340
3/32 (2.4)	ED034335	ED034338	ED034341
1/8 (3.2)	ED034336	ED034339	ED034342
5/32 (4.0)		ED034781	

WIRE COMPOSITION – As Required per AWS A5.18/A5.18M

	%C	%Mn	%S	%Si	%P
Requirements - AWS ER70S-6	0.06-0.15	1.40-1.85	0.035 max	0.80-1.15	0.025 max
Typical Results⁽²⁾	0.09	<1.60	0.007	0.90	0.007
	%Cu	%Cr	%Ni	%Mo	%V
Requirements - AWS ER70S-6	0.50 max	(1)	(1)	(1)	(1)
Typical Results⁽²⁾	0.20	0.05	0.05	0.05	0.05

⁽¹⁾Total 0.50% maximum, combined. ⁽²⁾See test results disclaimer

Anexo V.
WPS (Welding Procedure Specification) de los procesos de soldadura.



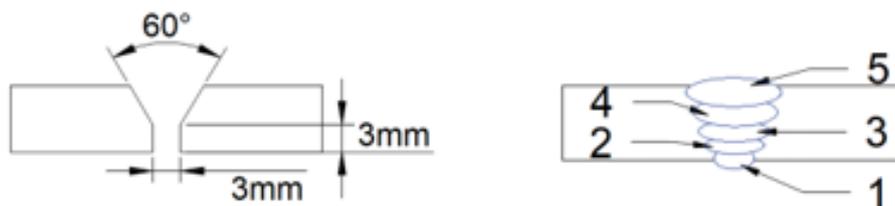
Escuela Politécnica Nacional
Facultad de Ingeniería Mecánica
Laboratorio de Soldadura



Especificación del Proceso de Soldadura (WPS)

Nombre Compañía: E.P.N. WPS No.: 1 Según norma: API 1104	No. Identificación: E.P.N. 01 Fecha: 22/10/2018 Realizado por: Guevara Ronnie, Sandoval Santiago Organización: Escuela Politécnica Nacional
Junta Utilizada Tipo de junta: En V Abertura raíz: 1/8" ≈ 3mm Talón: 1/8" ≈ 3mm Angulo de ranura: 60° +10° Placa de respaldo: No Preparar bisel: Si Método: Torneado	Técnica de soldadura Proceso de soldadura: SMAW Tipo de Soldadura: Manual Soldadura a: Un lado Cordón de respaldo: No Limpieza <ul style="list-style-type: none"> • Pase raíz: Grata • Pases siguientes: Grata
Metal Base Especificación: API 5L X-52 Diámetro 1: 7.18 mm Largo 1: 114.3 mm Diámetro 2: 7.18 mm Largo 2: 114.3 mm	Posición de Soldadura Posición de Soldadura: 6G Progresión: Descendente Técnica: Varios pases
Metal de Aporte Diámetro: 1/8" Denominación AWS: 5.5 Casa comercial: OERLIKON Denom. comercial: Cellocord 70T	Pre calentamiento: NA Tiempo entre pases: NA (60seg)
Notas	

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	E7010	3.17	DC-	75	27.6	280	X	
2	E7010	3.17	DC+	90	28.4	290	X	
3	E7010	3.17	DC+	93	26.8	300	X	
4	E7010	3.17	DC+	95	26.8	300	X	
5	E7010	3.17	DC+	90	34.5	290	x	

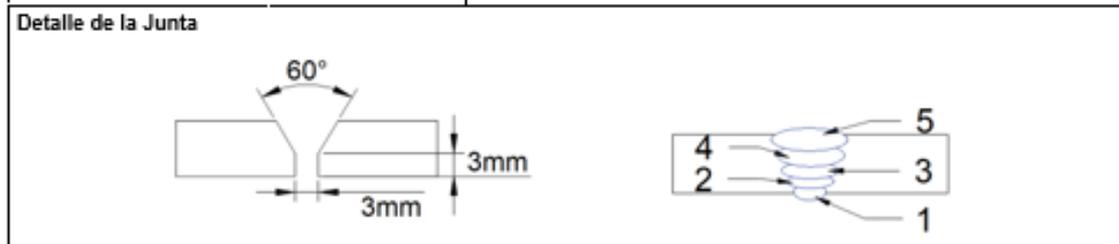


Escuela Politécnica Nacional
Facultad de Ingeniería Mecánica
Laboratorio de Soldadura



Calificación del Rendimiento de Soldadura (WPQ)

Nombre Compañía: E.P.N. WPS No.: 1 Según norma: API 1104	No. Identificación: E.P.N. 01 Fecha: 25/10/2018 Realizado por: Guevara Ronnie, Sandoval Santiago Organización: Escuela Politécnica Nacional
Junta Utilizada Tipo de junta: En V Abertura raíz: 1/8" ≈ 3mm Talón: 1/8" ≈ 3mm Angulo de ranura: 60° ±10° Placa de respaldo: No Preparar bisel: Si Método: Torneado	Técnica de soldadura Proceso de soldadura: SMAW Tipo de Soldadura: Manual Soldadura a: Un lado Cordón de respaldo: No Limpieza • Pase raíz: Grata • Pases siguientes: Grata
Metal Base Especificación: API 5L X-52 Diámetro 1: 7.18 mm Largo 1: 114.3 mm Diámetro 2: 7.18 mm Largo 2: 114.3 mm	Posición de Soldadura Posición de Soldadura: 6G Progresión: Descendente Técnica: Varios pases
Metal de Aporte Diámetro: 1/8" Denominación AWS: E5 Casa comercial: OERLIKON Denom. comercial: Cellocord 70T	Pre calentamiento: NA Tiempo entre pases: NA (60seg) Notas



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	E7010	3.17	DC-	75	27.6	280	X	
2	E7010	3.17	DC+	90	28.4	290	X	
3	E7010	3.17	DC+	93	28.8	300	X	
4	E7010	3.17	DC+	95	28.8	300	X	
5	E7010	3.17	DC+	90	34.5	290	x	

ENSAYO DE TENSION

Id. Probetas	Ancho Promedio mm	Espesor Promedio mm	Carga Máxima Registrada		Resistencia a la Tracción		Observaciones
			lbf	N	Ksi	MPa	
SW 1	29.11	7.53	22.896	101.848	67.4	464.6	Falla en material base
SW 7	28.86	7.45	22.040	98.037	66.1	456.0	Falla en material base

DOBLADO DE CARA Y RAIZ

Id. Probeta	Ensayo Aplicado	Resultado
SW 4	Doblado de cara	Sin observaciones / Aprueba
SW 10	Doblado de cara	Sin observaciones / Aprueba
SW 5	Doblado de raiz	Sin observaciones / Aprueba
SW 11	Doblado de raiz	Sin observaciones / Aprueba



Escuela Politécnica Nacional
Facultad de Ingeniería Mecánica
Laboratorio de Soldadura



Registro de Calificación del Procedimiento (PQR)

Nombre Compañía: E.P.N.
Nombre del Soldador: Jorge Guzmán
Proceso Usado: SMAW
WPS No.: 1
Material Base Soldado: API 5L X-52
Espesor: 7.2mm

Variables de Cada Proceso

Respaldo: No
Especificación del Acero: API 5L X-52
Tipo: Tubo Diámetro: 4" diámetro interno
Precalentamiento (T): No
Diámetro Del electrodo: 1/8" (3.1mm)
Denominación AWS: E7010
Casa comercial: OERLIKON
Posición de soldadura: 6G
Progresión: Oscilado

RESULTADO DE DOBLADO DE CARA Y RAIZ

Id. Probeta	Ensayo Aplicado	Resultado
SW 4	Doblado de cara	Sin observaciones / Aprueba
SW 10	Doblado de cara	Sin observaciones / Aprueba
SW 5	Doblado de raíz	Sin observaciones / Aprueba
SW 11	Doblado de raíz	Sin observaciones / Aprueba

RESULTADO DE INSPECCIÓN VISUAL

APARIENCIA	Buena
SOCAVAMIENTO	No
POROSIDAD	No
CONVEXIDAD	No
DISCONTINUIDADES	No
FECHA DE ENSAYO	25/10/2018
INSPECCIONADO POR	Ing. Gabriel Velasteguí

OBSERVACIONES:

El soldador es apto para procedimiento de soldadura SMAW, posición 6G en tubería API.

Elaborado por: Guevara Ronnie, Sandoval Santiago
Aprobado por: Ing. Gabriel Velasteguí
Fecha: 29/10/2018



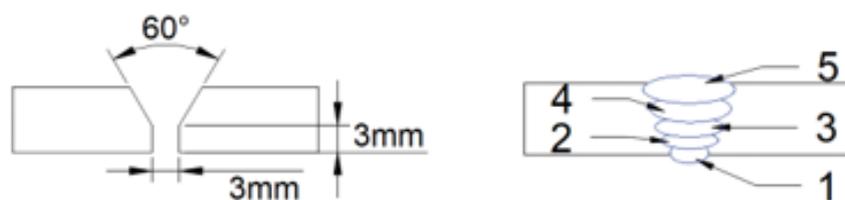
Escuela Politécnica Nacional
Facultad de Ingeniería Mecánica
Laboratorio de Soldadura



Especificación del Proceso de Soldadura (WPS)

Nombre Compañía: E.P.N. WPS No.: 2 Según norma: API 1104	No. Identificación: E.P.N. 02 Fecha: 22/10/2018 Realizado por: Guevara Ronnie, Sandoval Santiago Organización: Escuela Politécnica Nacional
Junta Utilizada Tipo de junta: En V Abertura raíz: 1/8" ≈ 3mm Talón: 1/8" ≈ 3mm Angulo de ranura: 60° +10" Placa de respaldo: No Preparar bisel: Si Método: Torneado	Técnica de soldadura Proceso de soldadura: SMAW Tipo de Soldadura: Manual Soldadura a: Un lado Cordón de respaldo: No Limpieza • Pase raíz: Grata • Pases siguientes: Grata
Metal Base Especificación: API 5L X-52 Diámetro 1: 7,18 mm Largo 1: 114.3 mm Diámetro 2: 7.18 mm Largo 2: 114.3 mm	Posición de Soldadura Posición de Soldadura: 6G Progresión: Descendente Técnica: Varios pases
Metal de Aporte Diámetro: 1/8" Denominación AWS: 5.5 Casa comercial: OERLIKON Denom. comercial: Cellocord 70T	Pre calentamiento: 140 °C Tiempo entre pases: NA (60seg) Notas

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	E7010	3.17	DC-	75	27.6	280	X	
2	E7010	3.17	DC+	90	28.4	290	X	
3	E7010	3.17	DC+	93	26.8	300	X	
4	E7010	3.17	DC+	95	26.8	300	X	
5	E7010	3.17	DC+	90	34.5	290	x	



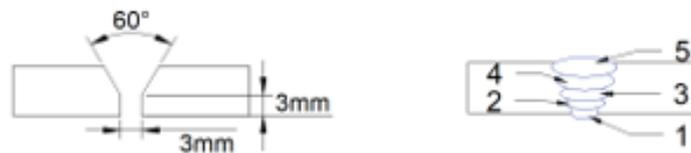
Escuela Politécnica Nacional
Facultad de Ingeniería Mecánica
Laboratorio de Soldadura



Calificación del Rendimiento de Soldadura (WPQ)

Nombre Compañía: E.P.N. WPS No.: 2 Según norma: API 1104	No. Identificación: E.P.N. 02 Fecha: 25/10/2018 Realizado por: Guevara Ronnie, Sandoval Santiago Organización: Escuela Politécnica Nacional
Junta Utilizada Tipo de junta: En V Abertura raíz: 1/8" ≈ 3mm Talón: 1/8" ≈ 3mm Angulo de ranura: 60° ±10° Placa de respaldo: No Preparar bisel: Si Método: Torneado	Técnica de soldadura Proceso de soldadura: SMAW Tipo de Soldadura: Manual Soldadura a: Un lado Cordón de respaldo: No Limpieza • Pase raíz: Grata • Pases siguientes: Grata
Metal Base Especificación: API 5L X-52 Diámetro 1: 7.18 mm Largo 1: 114.3 mm Diámetro 2: 7.18 mm Largo 2: 114.3 mm	Posición de Soldadura Posición de Soldadura: 6G Progresión: Descendente Técnica: Varios pases
Metal de Aporte Diámetro: 1/8" Denominación AWS: 5.5 Casa comercial: OERLIKON Denom. comercial: Cellocord 70T	Pre calentamiento: 140 °C Tiempo entre pases: NA (60seg) Notas

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	E7010	3.17	DC-	75	27.6	280	X	
2	E7010	3.17	DC+	90	28.4	290	X	
3	E7010	3.17	DC+	93	28.8	300	X	
4	E7010	3.17	DC+	95	28.8	300	X	
5	E7010	3.17	DC+	90	34.5	290	x	

ENSAYO DE TENSIÓN

Id. Probetas	Ancho Promedio (mm)	Espesor Promedio (mm)	Carga Maxima Registrada		Resistencia a la Tracción		Observaciones
			lbf	N	Ksi	MPa	
SC 1	26.45	7.34	19.857	88.327	66.0	455.0	Falla en material base
SC 7	29.59	7.48	21.887	97.360	66.0	455.3	Falla en material base

DOBLADO DE CARA Y RAÍZ

Id. Probeta	Ensayo Aplicado	Resultado
SC 4	Doblado de cara	Sin observaciones / Aprueba
SC 10	Doblado de cara	Sin observaciones / Aprueba
SC 5	Doblado de raíz	Sin observaciones / Aprueba
SC 11	Doblado de raíz	Sin observaciones / Aprueba



Escuela Politécnica Nacional
Facultad de Ingeniería Mecánica
Laboratorio de Soldadura



Registro de Calificación del Procedimiento
(PQR)

Nombre Compañía: E.P.N.
Nombre del Soldador: Jorge Guzmán
Proceso Usado: SMAW
WPS No.: 2
Material Base Soldado: API 5L X-52
Espesor: 7.2mm

Variables de Cada Proceso

Respaldo: No
Especificación del Acero: API 5L X-52
Tipo: Tubo Diámetro: 4" diámetro interno
Precalentamiento (T): Si (140°C)
Diámetro Del electrodo: 1/8" (3.1mm)
Denominación AWS: E7010
Casa comercial: OERLIKON
Posición de soldadura: 6G
Progresión: Oscilado

RESULTADO DE DOBLADO DE CARA Y RAIZ

Id. Probeta	Ensayo Aplicado	Resultado
SC 4	Doblado de cara	Sin observaciones / Aprueba
SC 10	Doblado de cara	Sin observaciones / Aprueba
SC 5	Doblado de raíz	Sin observaciones / Aprueba
SC 11	Doblado de raíz	Sin observaciones / Aprueba

RESULTADO DE INSPECCIÓN VISUAL

APARIENCIA	Buena
SOCAVAMIENTO	No
POROSIDAD	No
CONVEXIDAD	No
DISCONTINUIDADES	No
FECHA DE ENSAYO	25/10/2018
INSPECCIONADO POR	Ing. Gabriel Velasteguí

OBSERVACIONES:

El soldador es apto para procedimiento de soldadura SMAW, posición 6G en tubería API.

Elaborado por: Guevara Ronnie, Sandoval Santiago

Aprobado por: Ing. Gabriel Velasteguí

Fecha: 29/10/2018



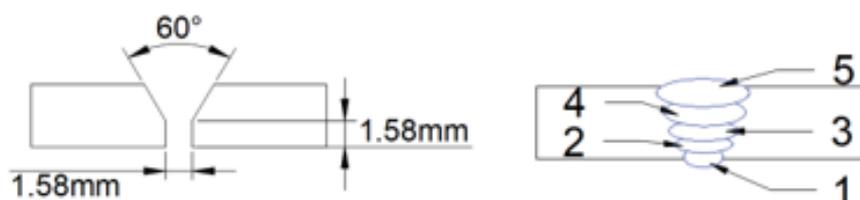
Escuela Politécnica Nacional
Facultad de Ingeniería Mecánica
Laboratorio de Soldadura



Especificación del Proceso de Soldadura (WPS)

Nombre Compañía: E.P.N. WPS No.: 3 Según norma: API 1104	No. Identificación: E.P.N. 03 Fecha: 23/10/2018 Realizado por: Guevara Ronnie, Sandoval Santiago Organización: Escuela Politécnica Nacional
Junta Utilizada Tipo de junta: En V Abertura raíz: $1/16" \approx 1.58\text{mm}$ Talón: $1/16" \approx 1.58\text{mm}$ Angulo de ranura: $60^\circ \pm 10$ Placa de respaldo: No Preparar bisel: Si Método: Torneado	Técnica de soldadura Proceso de soldadura: GTAW Tipo de Soldadura: Manual Soldadura a: Un lado Cordón de respaldo: No Limpieza • Pase raíz: Grata • Pases siguientes: Grata
Metal Base Especificación: API 5L X-52 Diámetro 1: 7,18 mm Largo 1: 114.3 mm Diámetro 2: 7.18 mm Largo 2: 114.3 mm	Posición de Soldadura Posición de Soldadura: 6G Progresión: Ascendente Técnica: Varios pases Precalentamiento: NA Tiempo entre pases: NA (60seg)
Metal de Aporte Diámetro: 2.4mm Denominación AWS: A5.18 Casa comercial: LINDE Denom. comercial: ER70S-6	Electrodo no consumible Diámetro: $3/32"$ Longitud: 7" Denominación AWS: EWTh (2% torio) Casa comercial: MEKAWELD

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	ER70S-6	2.4	DC+	114	9.6	35	X	
2	ER70S-6	2.4	DC+	104	10.4	42	X	
3	ER70S-6	2.4	DC+	104	10.8	44	X	
4	ER70S-6	2.4	DC+	104	10.8	51	X	
5	ER70S-6	2.4	DC+	114	10.2	41	x	



Escuela Politécnica Nacional
Facultad de Ingeniería Mecánica
Laboratorio de Soldadura



Calificación del Rendimiento de Soldadura (WPQ)

Nombre Compañía: E.P.N. WPS No.: 3 Según norma: API 1104	No. Identificación: E.P.N. 03 Fecha: 28/10/2018 Realizado por: Guevara Ronnie, Sandoval Santiago Organización: Escuela Politécnica Nacional
Junta Utilizada Tipo de junta: En V Abertura raíz: 1/16" ≈ 1.58mm Talón: 1/16" ≈ 1.58mm Angulo de ranura: 60° **10 Placa de respaldo: No Preparar bisel: Si Método: Torneado	Técnica de soldadura Proceso de soldadura: GTAW Tipo de Soldadura: Manual Soldadura a: Un lado Cordón de respaldo: No Limpieza • Pase raíz: Grata • Pases siguientes: Grata
Metal Base Especificación: API 5L X-52 Diámetro 1: 7.18 mm Largo 1: 114.3 mm Diámetro 2: 7.18 mm Largo 2: 114.3 mm	Posición de Soldadura Posición de Soldadura: 6G Progresión: Ascendente Técnica: Varios pases Precalentamiento: NA Tiempo entre pases: NA (60seg)
Metal de Aporte Diámetro: 2.4mm Denominación AWS: A5.18 Casa comercial: LINDE Denom. comercial: ER70S-8	Electrodo no consumible Diámetro: 3/32" Longitud: 7" Denominación AWS: EWTh (2% torio) Casa comercial: MEKAWELD

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	ER70S-8	2.4	DC+	114	9.8	35	X	
2	ER70S-8	2.4	DC+	104	10.4	42	X	
3	ER70S-8	2.4	DC+	104	10.8	44	X	
4	ER70S-8	2.4	DC+	104	10.8	51	X	
5	ER70S-8	2.4	DC+	114	10.2	41	x	

ENSAYO DE TENSION

Id. Probetas	Ancho Promedio mm	Espesor Promedio mm	Carga Máxima Registrada		Resistencia a la Tracción		Observaciones
			lbf	N	Ksi	MPa	
GW 1	30.27	7.52	23.963	106.592	67.9	468.3	Falla en material base
GW 7	25.45	7.47	20.429	90.875	69.3	478.0	Falla en material base

DOBLADO DE CARA Y RAIZ

Id. Probeta	Ensayo Aplicado	Resultado
GW 4	Doblado de cara	Sin observaciones / Aprueba
GW 10	Doblado de cara	Sin observaciones / Aprueba
GW 5	Doblado de raiz	Sin observaciones / Aprueba
GW 11	Doblado de raiz	Sin observaciones / Aprueba



Escuela Politécnica Nacional
Facultad de Ingeniería Mecánica
Laboratorio de Soldadura



Registro de Calificación del Procedimiento
(PQR)

Nombre Compañía: E.P.N.
Nombre del Soldador: Jorge Guzmán
Proceso Usado: GTAW
WPS No.: 3
Material Base Soldado: API 5L X-52
Espesor: 7.2mm

Variables de Cada Proceso

Respaldo: No
Especificación del Acero: API 5L X-52
Tipo: Tubo Diámetro: 4° diámetro interno
Precalentamiento (T): No
Diámetro del material de aporte: 2.4mm
Denominación AWS: ER70S-6
Casa comercial: LINDE
Posición de soldadura: 6G
Progresión: Oscilado / Ascendente
Gas de protección: Argón 99.99%
Flujo de gas: 30 litros/min

RESULTADO DE DOBLADO DE CARA Y RAIZ

Id. Probeta	Ensayo Aplicado	Resultado
GW 4	Doblado de cara	Sin observaciones / Aprueba
GW 10	Doblado de cara	Sin observaciones / Aprueba
GW 5	Doblado de raíz	Sin observaciones / Aprueba
GW 11	Doblado de raíz	Sin observaciones / Aprueba

RESULTADO DE INSPECCIÓN VISUAL

APARIENCIA	Buena
SOCAVAMIENTO	No
POROSIDAD	No
CONVEXIDAD	No
DISCONTINUIDADES	No
FECHA DE ENSAYO	26/10/2018
INSPECCIONADO POR	Ing. Gabriel Velasteguí

OBSERVACIONES:

El soldador es apto para procedimiento de soldadura GTAW, posición 6G en tubería API.

Elaborado por: Guevara Ronnie, Sandoval Santiago
Aprobado por: Ing. Gabriel Velasteguí
Fecha: 30/10/2018



Escuela Politécnica Nacional
Facultad de Ingeniería Mecánica
Laboratorio de Soldadura



Especificación del Proceso de Soldadura (WPS)

Nombre Compañía: E.P.N. WPS No.: 4 Según norma: API 1104	No. Identificación: E.P.N. 04 Fecha: 23/10/2018 Realizado por: Guevara Ronnie, Sandoval Santiago Organización: Escuela Politécnica Nacional
Junta Utilizada Tipo de junta: En V Abertura raíz: 1/16" ≈ 1.58mm Talón: 1/16" ≈ 1.58mm Angulo de ranura: 60° ⁺¹⁰ Placa de respaldo: No Preparar bisel: Si Método: Torneado	Técnica de soldadura Proceso de soldadura: GTAW Tipo de Soldadura: Manual Soldadura a: Un lado Cordón de respaldo: No Limpieza • Pase raíz: Grata • Pases siguientes: Grata
Metal Base Especificación: API 5L X-52 Diámetro 1: 7.18 mm Largo 1: 114.3 mm Diámetro 2: 7.18 mm Largo 2: 114.3 mm	Posición de Soldadura Posición de Soldadura: 6G Progresión: Ascendente Técnica: Varios pases Precaentamiento: 140 °C Tiempo entre pases: NA (60seg)
Metal de Aporte Diámetro: 2.4mm Denominación AWS: A5.18 Casa comercial: LINDE Denom. comercial: ER70S-6	Electrodo no consumible Diámetro: 3/32" Longitud: 7" Denominación AWS: EWTh (2% torio) Casa comercial: MEKAWELD

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	ER70S-6	2.4	DC+	114	9.6	36	X	
2	ER70S-6	2.4	DC+	104	10.4	43	X	
3	ER70S-6	2.4	DC+	104	10.8	44	X	
4	ER70S-6	2.4	DC+	104	10.8	51	X	
5	ER70S-6	2.4	DC+	114	10.2	40	x	



Escuela Politécnica Nacional
Facultad de Ingeniería Mecánica
Laboratorio de Soldadura



Calificación del Rendimiento de Soldadura (WPQ)

Nombre Compañía: E.P.N. WPS No.: 4 Según norma: API 1104	No. Identificación: E.P.N. 04 Fecha: 26/10/2018 Realizado por: Guevara Ronnie, Sandoval Santiago Organización: Escuela Politécnica Nacional
Junta Utilizada Tipo de junta: En V Abertura raíz: 1/16" ≈ 1.58mm Talón: 1/16" ≈ 1.58mm Angulo de ranura: 60° ±10 Placa de respaldo: No Preparar bisel: Si Método: Torneado	Técnica de soldadura Proceso de soldadura: GTAW Tipo de Soldadura: Manual Soldadura a: Un lado Cordón de respaldo: No Limpieza • Pase raíz: Grata • Pases siguientes: Grata
Metal Base Especificación: API 5L X-52 Diámetro 1: 7.18 mm Largo 1: 114.3 mm Diámetro 2: 7.18 mm Largo 2: 114.3 mm	Posición de Soldadura Posición de Soldadura: 6G Progresión: Ascendente Técnica: Varios pases Precalentamiento: 140 °C Tiempo entre pases: NA (60seg)
Metal de Aporte Diámetro: 2.4mm Denominación AWS: A5.18 Casa comercial: LINDE Denom. comercial: ER70S-8	Electrodo no consumible Diámetro: 3/32" Longitud: 7" Denominación AWS: EWTh (2% torio) Casa comercial: MEKAWELD

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	ER70S-8	2.4	DC+	114	9.8	38	X	
2	ER70S-8	2.4	DC+	104	10.4	43	X	
3	ER70S-8	2.4	DC+	104	10.8	44	X	
4	ER70S-8	2.4	DC+	104	10.8	51	X	
5	ER70S-8	2.4	DC+	114	10.2	40	x	

ENSAYO DE TENSION

Id. Probetas	Ancho Promedio (mm)	Espesor Promedio (mm)	Carga Maxima Registrada		Resistencia a la Tracción		Observaciones
			lbf	N	Ksi	MPa	
GC 1	30.27	7.52	23.665	105.266	87.1	482.4	Falla en material base
GC 7	30.03	7.39	22.934	102.018	86.7	459.7	Falla en material base

DOBLADO DE CARA Y RAZ

Id. Probeta	Ensayo Aplicado	Resultado
GC 4	Doblado de cara	Sin observaciones / Aprueba
GC 10	Doblado de cara	Sin observaciones / Aprueba
GC 5	Doblado de raiz	Sin observaciones / Aprueba
GC 11	Doblado de raiz	Sin observaciones / Aprueba



Escuela Politécnica Nacional
Facultad de Ingeniería Mecánica
Laboratorio de Soldadura



Registro de Calificación del Procedimiento
(PQR)

Nombre Compañía: E.P.N.
Nombre del Soldador: Jorge Guzmán
Proceso Usado: GTAW
WPS No.: 4
Material Base Soldado: API 5L X-52
Espesor: 7.2mm

Variables de Cada Proceso

Respaldo: No
Especificación del Acero: API 5L X-52
Tipo: Tubo Diámetro: 4" diámetro interno
Precalentamiento (T): Si (140°C)
Diámetro del material de aporte: 2.4mm
Denominación AWS: ER70S-6
Casa comercial: LINDE
Posición de soldadura: 6G
Progresión: Oscilado / Ascendente
Gas de protección: Argón 99.99%
Flujo de gas: 30 litros/min

RESULTADO DE DOBLADO DE CARA Y RAZ

Id. Probeta	Ensayo Aplicado	Resultado
GC 4	Doblado de cara	Sin observaciones / Aprueba
GC 10	Doblado de cara	Sin observaciones / Aprueba
GC 5	Doblado de raíz	Sin observaciones / Aprueba
GC 11	Doblado de raíz	Sin observaciones / Aprueba

RESULTADO DE INSPECCION VISUAL

APARIENCIA	Buena
SOCAVAMIENTO	No
POROSIDAD	No
CONVEXIDAD	No
DISCONTINUIDADES	No
FECHA DE ENSAYO	26/10/2018
INSPECCIONADO POR	Ing. Gabriel Velasteguí

OBSERVACIONES:

El soldador es apto para procedimiento de soldadura GTAW, posición 6G en tubería API.

Elaborado por: Guevara Ronnie, Sandoval Santiago
Aprobado por: Ing. Gabriel Velasteguí
Fecha: 30/10/2018

Anexo VI.
Especificación técnica del cloruro de sodio.

El siguiente anexo presenta las características del cloruro de sodio dados por el proveedor ComerQuimiCor Cia. Ltda.

SECCIÓN 1: DATOS DEL MATERIAL Y PROVEEDOR

NOMBRE COMERCIAL: CLORURO DE SODIO (SAL)
NOMBRE PROVEEDOR: COMERQUIMICOR CIA. LTDA.
DIRECCIÓN: VERSALLES N17-190 Y SANTIAGO
TELEFONOS: (02) 2527465/ 2557681
FORMULA QUÍMICA: NaCl
PESO MOLECULAR: 58.44 g/mol
CLASIFICACIÓN NFPA:



Salud: Ligero
Fuego: Mínimo
Reactividad: Mínimo
Específico: Ninguno

SECCIÓN 2: COMPOSICIÓN / INFORMACIÓN SOBRE LOS COMPONENTES

COMPONENTES	%ACTIVOS	NUMERO CAS
CLORURO DE SODIO	>99%	7647-14-5

SECCIÓN 3: IDENTIFICACIÓN DE LOS PELIGROS

3.1 Clasificación de la sustancia o de la mezcla

CLASIFICACIÓN según el Sistema Globalmente Armonizado

Este producto no cumple los criterios para clasificarse en una clase de peligro con arreglo a la Resolución 801/2015 de la Superintendencia de Riesgos del Trabajo, dependiente del Ministerio de Trabajo, Empleo y Seguridad Social. Sin embargo, se facilitará una ficha de datos de seguridad a pedido.

3.2 Elementos de la etiqueta

Pictograma: NINGUNO

Palabra de advertencia: SIN PALABRA DE ADVERTENCIA

3.3 Otros peligros

Ninguno.

Anexo VII.

**INFORMES DE LOS DIFERENTES ENSAYOS REALIZADOS POR
LOS LABORATORIOS DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA
MECÁNICA DE LA ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL.**

El siguiente anexo presenta los informes técnicos de los análisis realizados en el presente proyecto de titulación. Estos fueron realizados en los laboratorios de la facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional.



INFORME TÉCNICO

LAEV – JUL.18.02.1

Quito, 6 de septiembre de 2018

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

Los resultados contenidos en el presente informe corresponden a ensayos realizados en probetas de acero pertenecientes a los Sres. Santiago Sandoval y Ronnie Guevara para el proyecto de titulación "ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LA SOLDADURA EN UNA TUBERÍA API 5L X52 EXPUESTA EN AMBIENTE SALINO, CON LOS PROCESOS GTAW CON ELECTRODO ER70S-6 Y SMAW CON ELECTRODO E7010". Las probetas fueron entregadas en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Escuela Politécnica Nacional.

RESULTADOS

- MUESTRAS:** Dos (2) probetas de acero para ensayo de tracción.
- ENSAYO DE TRACCIÓN A MATERIAL BASE**

En la tabla 1 se presentan los resultados de los ensayos de tracción realizados.

Tabla 1. Resultados de los ensayos de tracción.

Id.	Ancho promedio	Espesor promedio	Carga máxima registrada		Límite de fluencia		Resistencia a la tracción		% Elongación en 50 mm
	mm	mm	lbf	N	ksi	MPa	ksi	MPa	
T1	25,87	7,42	19.943	88.711	62,3	429,2	67,0	462,1	43,9
T2	25,61	7,14	19.141	85.143	62,5	431,1	67,5	465,6	43,9

	REVISADO POR:	APROBADO POR:
Firma:		
Nombre:	Ing. Jonathan Castro, M.Sc.	Ing. Mario Granja, M.Sc.
Cargo:	TÉCNICO DOCENTE	JEFE
LABORATORIO DE ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES		



INFORME TÉCNICO

Solicitado por: Ing. Carlos Wime Díaz Campoverde Msc.

Tipo de Trabajo: Espectrometría por chispa

Fecha: 13 de septiembre del 2018

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

Descripción: Muestras de acero

1. ANTECEDENTES.

Se recibe en el Laboratorio de Fundición de la Escuela Politécnica Nacional dos probetas de material acero.

Se solicita realizar la prueba de espectrometría con la finalidad de determinar los componentes presentes en las muestras entregadas.

2. IDENTIFICACIÓN DE LAS PROBETAS.

Las probetas para el análisis correspondiente son identificadas como se muestra a continuación:

Nombre	Identificación de las probetas	Identificación Gráfica
API 5L X52	Muestra M1	
	Muestra M2	





ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

DEPARTAMENTO DE MATERIALES

LABORATORIO DE FUNDICIÓN



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 promediaron sus valores.

		Muestra M1	Muestra M2
Elemento		Valor [%]	Valor [%]
Carbono	[C]	0,113	0,103
Silicio	[Si]	0,231	0,253
Manganeso	[Mn]	0,936	1,051
Fósforo	[P]	0,020	0,025
Cromo	[Cr]	0,067	0,073
Molibdeno	[Mo]	0,025	0,030
Níquel	[Ni]	0,070	0,091
Cobre	[Cu]	0,069	0,072
Aluminio	[Al]	0,021	0,021
Hierro	[Fe]	98,44	98,27
Total		99,99	99,98

Ing. Luis G. Huilca

Técnico Responsable

Ing. Oscar Sotomayor

Jefe del 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 – M19.006

Quito, 8 de enero de 2019

Solicitado por: Msc. Carlos Díaz
Persona de contacto: Ronnie Guevara y Santiago Sandoval
Teléfono: 0998412322
Correo: ronnie.guevara@epn.edu.ec
Fecha de recepción: 20/12/2018
Fecha de ejecución: 08/12/2018

ORDEN DE TRABAJO N°: N/A

1. MUESTRAS: Ocho (8) probetas de junta soldada para ensayo de tracción.

2. GENERALIDADES E IDENTIFICACIÓN:

La siguiente descripción fue proporcionada por el cliente:

Título de la tesis: ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LA SOLDADURA EN UNA TUBERÍA API 5LX52 EXPUESTO EN AMBIENTE SALINO CON LOS PROCESOS GTAW CON ELECTRODO ER70S-6 Y SMAW CON ELECTRODO E7010

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

Tabla 1. Identificación de las muestras.

Id. cliente	Id. del LAEV
GW1	M19.006.01
GW7	M19.006.02
SW1	M19.006.03
SW7	M19.006.04
SC1	M19.006.05
SC7	M19.006.06
GC1	M19.006.07
GC7	M19.006.08



3. CONDICIONES AMBIENTALES:

Temperatura: $26,0 \pm 1,1^{\circ}\text{C}$

Humedad relativa: $45,5 \pm 3,2\%$

4. ENSAYO DE TRACCION EN JUNTAS SOLDADAS

Requisitos del material API 5LX52 según norma API 5L:2018

- La resistencia mínima a la tracción: 66 ksi (455 MPa)

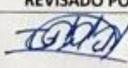
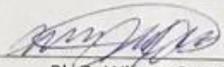
En la tabla 2 se presentan los resultados obtenidos en el ensayo de tracción

Tabla 2. Resistencia a la tracción obtenida en el ensayo.

Id.	Ancho Promedio	Espesor Promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		Obs.
	mm	mm	lbf	N	ksi	MPa	
M19.006.01	30,27	7,52	23 963	106 592	67,9	468,3	FMB
M19.006.02	25,45	7,47	20 429	90 875	69,3	478,0	FMB
M19.006.03	29,11	7,53	22 896	101 848	67,4	464,6	FMB
M19.006.04	28,86	7,45	22 040	98 037	66,1	456,0	FMB
M19.006.05	30,27	7,52	23 665	105 266	67,1	462,4	FMB
M19.006.06	30,03	7,39	22 934	102 016	66,7	459,7	FMB
M19.006.07	26,45	7,34	19 857	88 327	66,0	455,0	FMB
M19.006.08	28,59	7,48	21 887	97 360	66,0	455,3	FMB

*FMB: Falla en el material base

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:		
Nombre:	Ing. Jonathan Castro, M.Sc.	Ph.D. Wilson Guachamin
Cargo:	TÉCNICO DOCENTE	JEFE

LABORATORIO DE ANALISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES

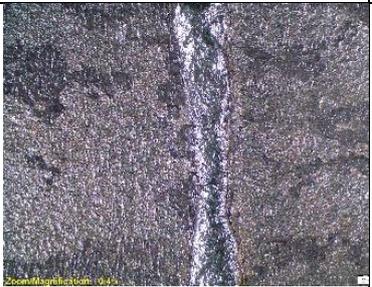
LAEV – M19.006

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

ANEXO VIII

Macrografías de las probetas corroídas con aumento de 4X

El siguiente anexo presenta las macrografías de las probetas corroídas, las cuales sirvieron para realizar un seguimiento del efecto de corrosión en cada una de ellas, las fotografías fueron tomadas en el Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla (LMDF) de la Escuela Politécnica Nacional.

Probeta 501		
168 horas	336 horas	504 horas
		
672 horas	840 horas	1008 horas
		
1176 horas	1344 horas	1512 horas
		
1680 horas	1848 horas	
		

Probeta 502		
168 horas	336 horas	504 horas
		
672 horas	840 horas	1008 horas
		
1176 horas	1344 horas	1512 horas
		
1680 horas	1848 horas	2016 horas
		

Probeta 503		
168 horas	336 horas	504 horas
		
672 horas	840 horas	1008 horas
		
1176 horas	1344 horas	1512 horas
		
1680 horas	1848 horas	2016 horas
		

Probeta 591		
168 horas	336 horas	504 horas
		
672 horas	840 horas	1008 horas
		
1176 horas	1344 horas	1512 horas
		
1680 horas	1848 horas	2016 horas
		

Probeta 592		
168 horas	336 horas	504 horas
		
672 horas	840 horas	1008 horas
		
1176 horas	1344 horas	1512 horas
		
1680 horas	1848 horas	2016 horas
		

Probeta 593		
168 horas	336 horas	504 horas
		
672 horas	840 horas	1008 horas
		
1176 horas	1344 horas	1512 horas
		
1680 horas	1848 horas	2016 horas
		

Probeta 601		
168 horas	336 horas	504 horas
		
672 horas	840 horas	1008 horas
		
1176 horas	1344 horas	1512 horas
		
1680 horas	1848 horas	2016 horas
		

Probeta 602		
168 horas	336 horas	504 horas
		
672 horas	840 horas	1008 horas
		
1176 horas	1344 horas	1512 horas
		
1680 horas	1848 horas	2016 horas
		

Probeta 603		
168 horas	336 horas	504 horas
		
672 horas	840 horas	1008 horas
		
1176 horas	1344 horas	1512 horas
		
1680 horas	1848 horas	
		

Probeta 691		
168 horas	336 horas	504 horas
		
672 horas	840 horas	1008 horas
		
1176 horas	1344 horas	1512 horas
		
1680 horas	1848 horas	2016 horas
		

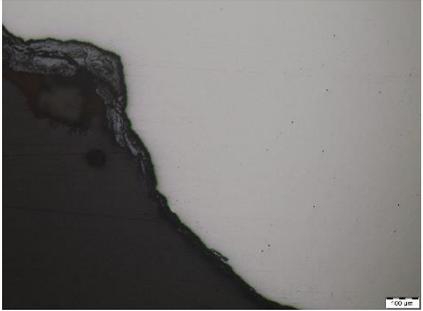
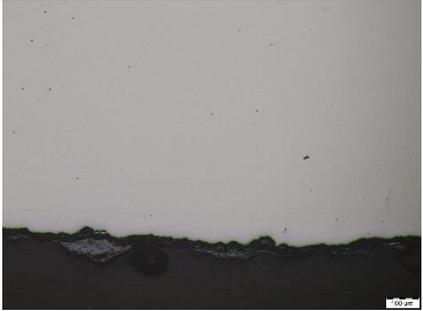
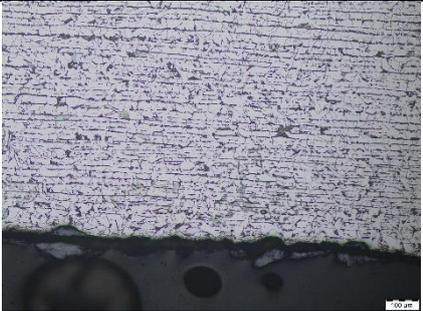
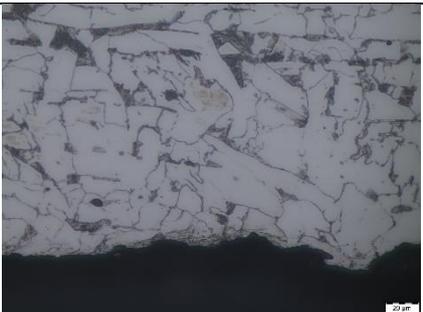
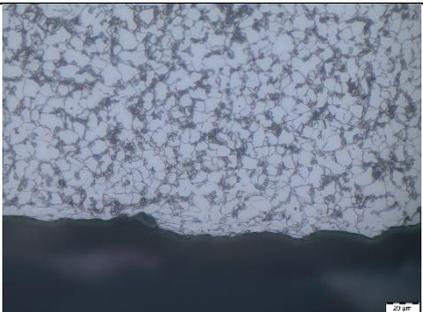
Probeta 692		
168 horas	336 horas	504 horas
		
672 horas	840 horas	1008 horas
		
1176 horas	1344 horas	1512 horas
		
1680 horas	1848 horas	2016 horas
		

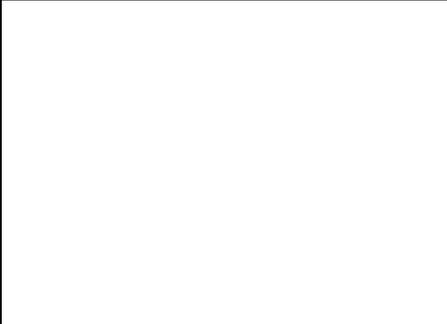
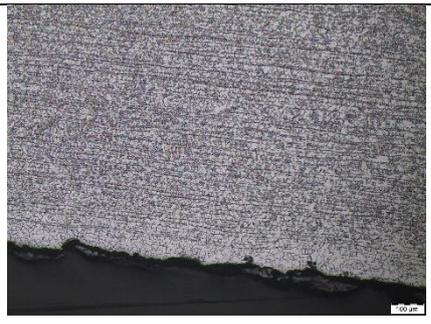
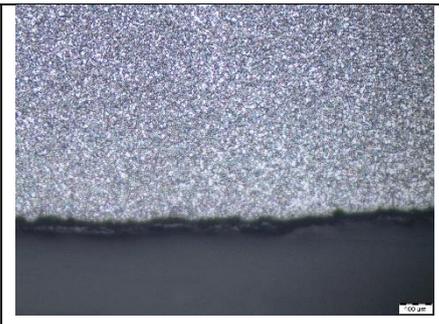
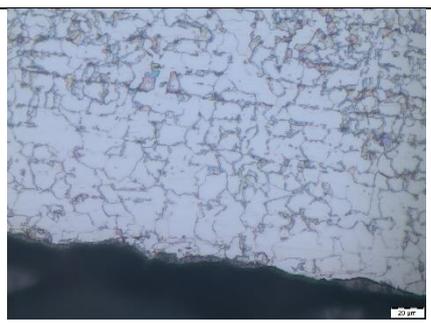
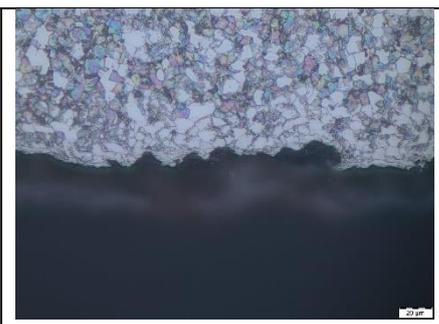
Probeta 693		
168 horas	336 horas	504 horas
		
672 horas	840 horas	1008 horas
		
1176 horas	1344 horas	1512 horas
		
1680 horas	1848 horas	2016 horas
		

ANEXO IX

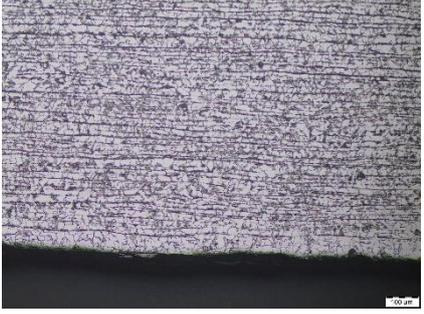
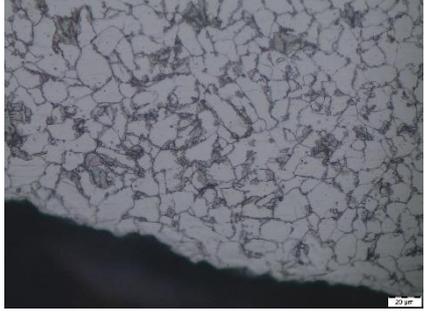
Micrografías de las probetas corroídas con aumento de X100 y x500

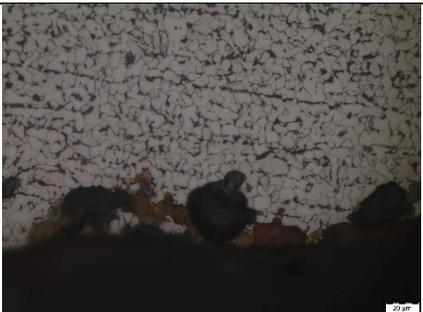
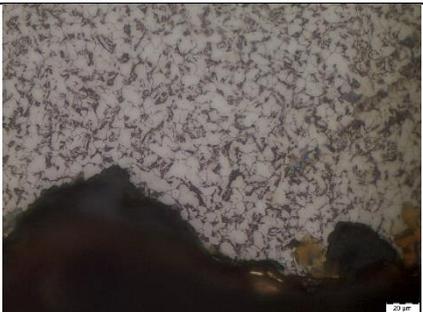
El siguiente anexo presenta las micrografías de las probetas corroídas, las cuales sirvieron para analizar el efecto de corrosión en cada una de ellas, las fotografías fueron tomadas en el Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla (LMDF) de la Escuela Politécnica Nacional.

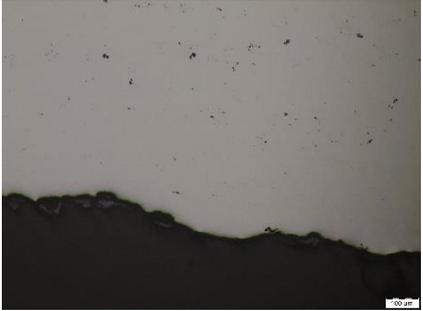
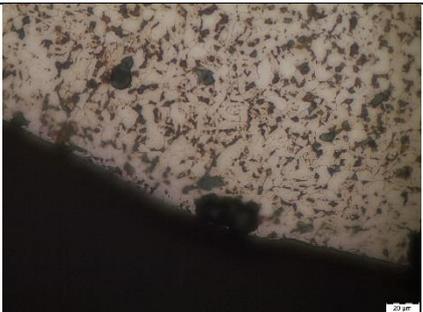
Probeta 50		
Material Base	Zona Afectada por el Calor	Material de Aporte
Sin Ataque Químico X100		
		
Con Ataque Químico X100		
		
Con Ataque Químico X500		
		

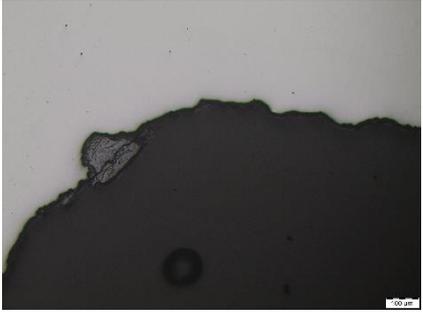
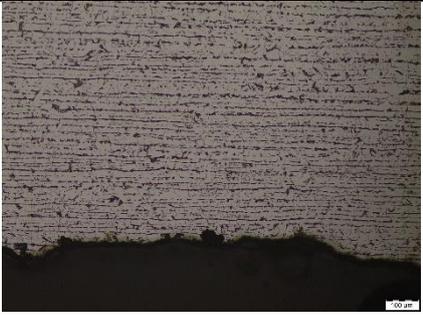
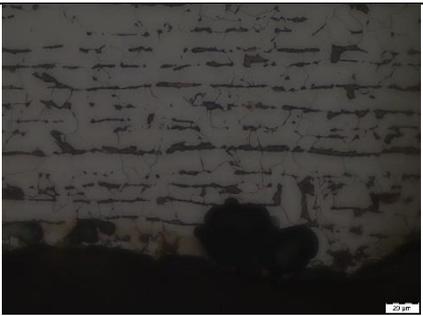
Probeta 59		
Material Base	Zona Afectada por el Calor	Material de Aporte
Sin Ataque Químico X100		
		
Con Ataque Químico X100		
		
Con Ataque Químico X500		
		

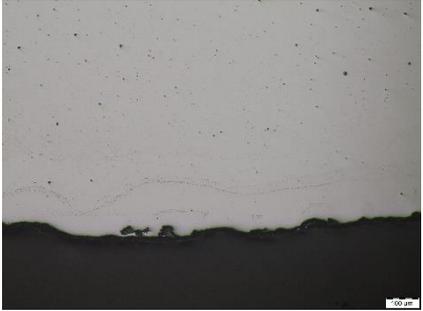
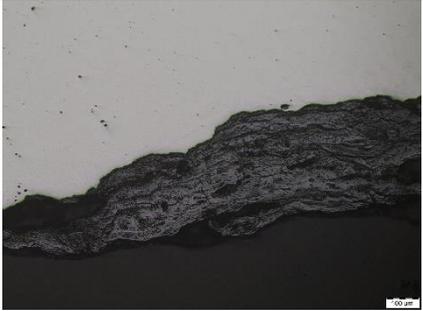
Probeta 60		
Material Base	Zona Afectada por el Calor	Material de Aporte
Sin Ataque Químico X100		
Con Ataque Químico X100		
Con Ataque Químico X500		

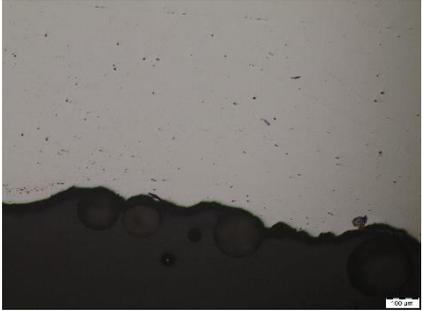
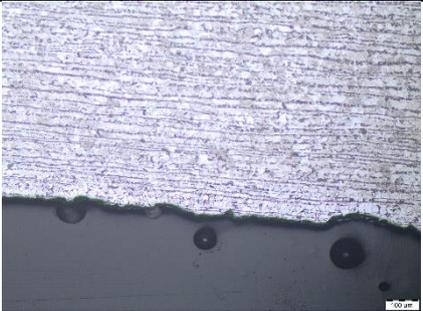
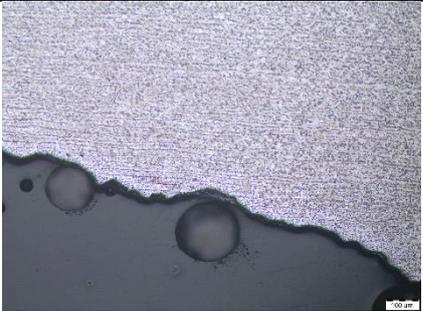
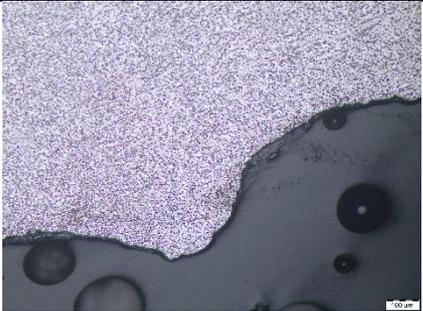
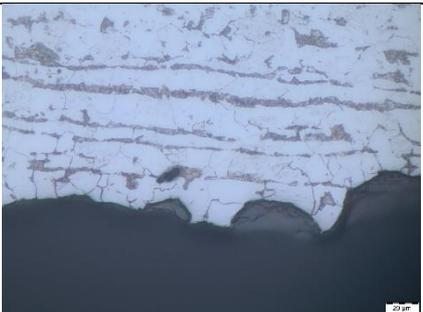
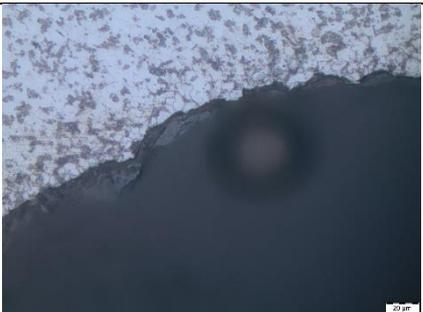
Probeta 69		
Material Base	Zona Afectada por el Calor	Material de Aporte
Sin Ataque Químico X100		
		
Con Ataque Químico X100		
		
Con Ataque Químico X500		
		

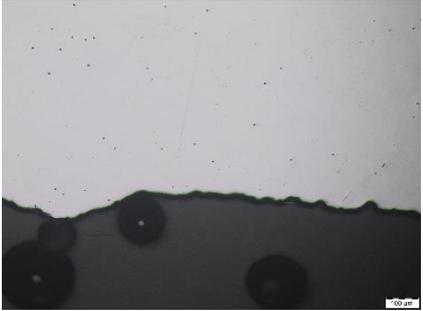
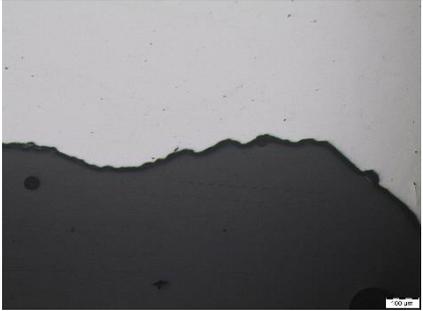
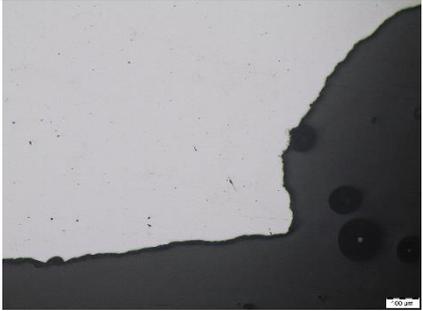
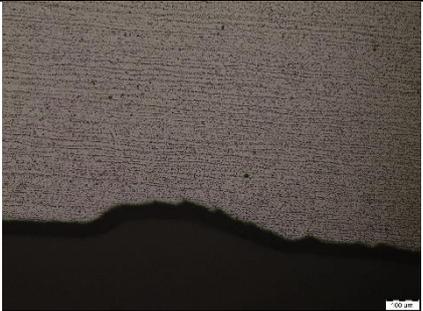
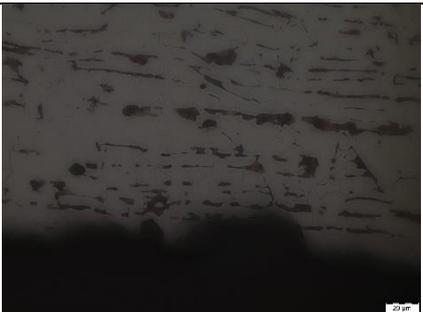
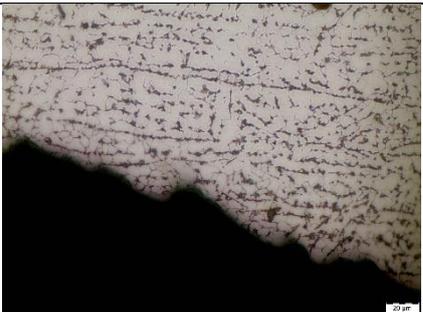
Probeta 501		
Material Base	Zona Afectada por el Calor	Material de Aporte
Sin Ataque Químico X100		
		
Con Ataque Químico X100		
		
Con Ataque Químico X500		
		

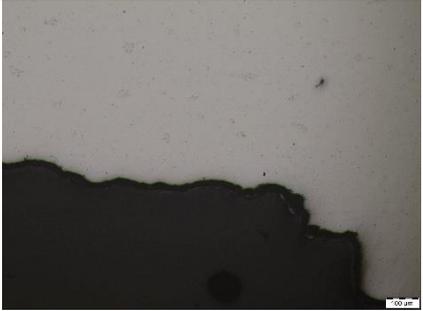
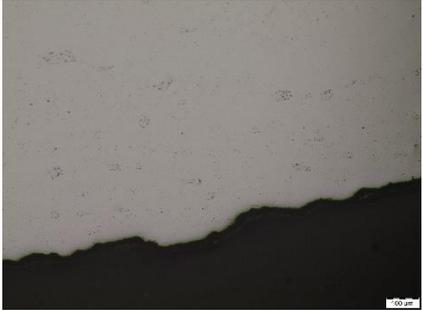
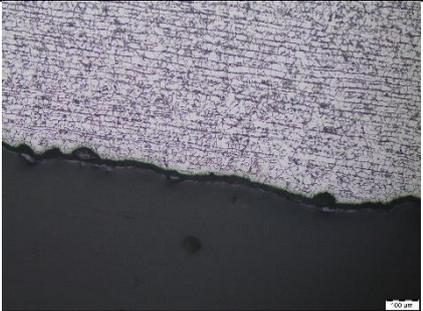
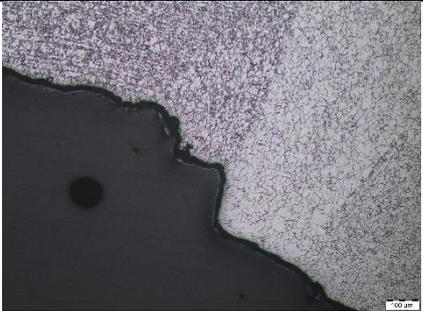
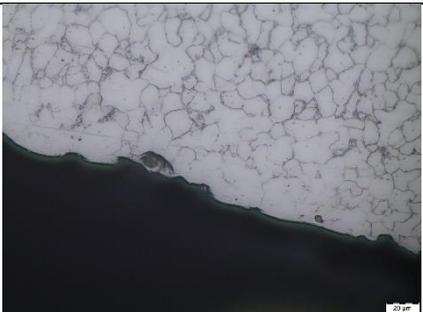
Probeta 502		
Material Base	Zona Afectada por el Calor	Material de Aporte
Sin Ataque Químico X100		
		
Con Ataque Químico X100		
		
Con Ataque Químico X500		
		

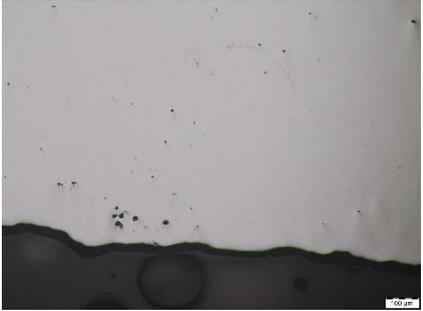
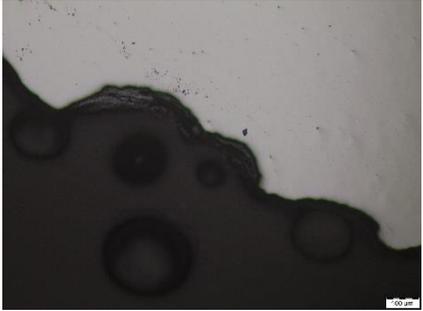
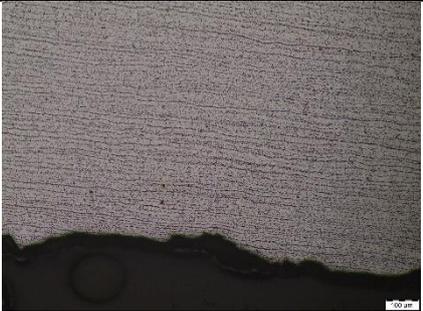
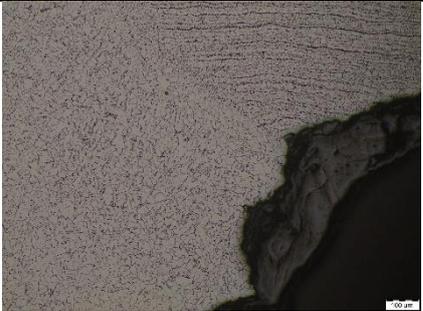
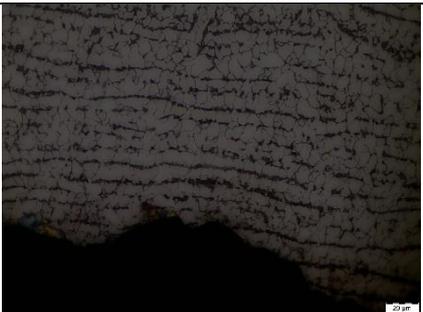
Probeta 503		
Material Base	Zona Afectada por el Calor	Material de Aporte
Sin Ataque Químico X100		
		
Con Ataque Químico X100		
		
Con Ataque Químico X500		
		

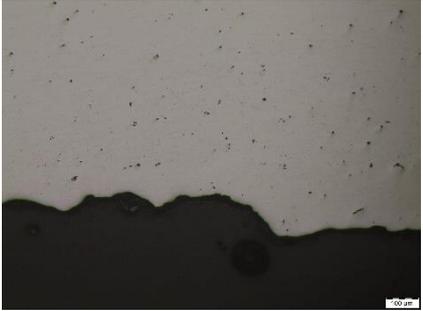
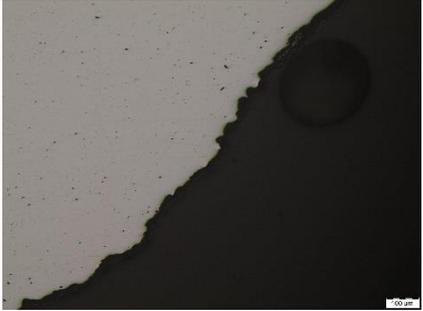
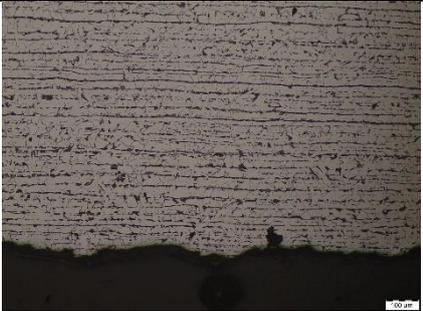
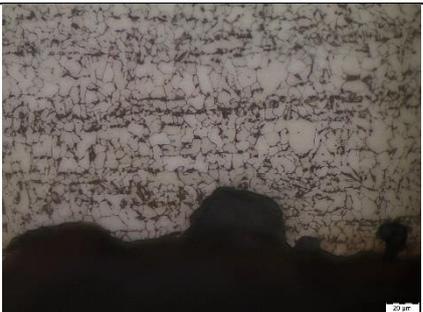
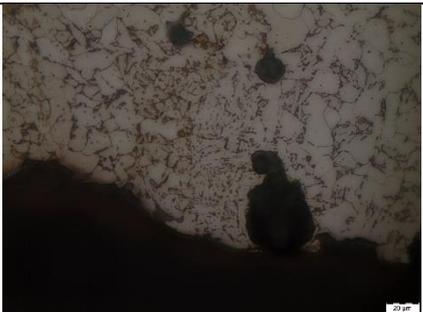
Probeta 591		
Material Base	Zona Afectada por el Calor	Material de Aporte
Sin Ataque Químico X100		
		
Con Ataque Químico X100		
		
Con Ataque Químico X500		
		

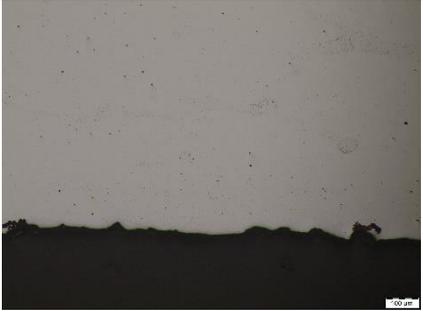
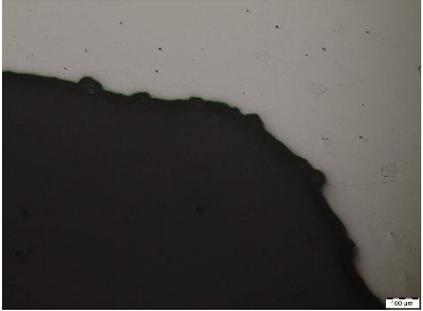
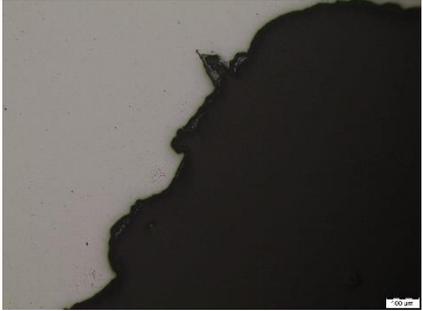
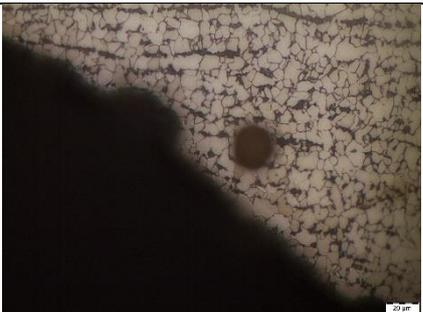
Probeta 592		
Material Base	Zona Afectada por el Calor	Material de Aporte
Sin Ataque Químico X100		
		
Con Ataque Químico X100		
		
Con Ataque Químico X500		
		

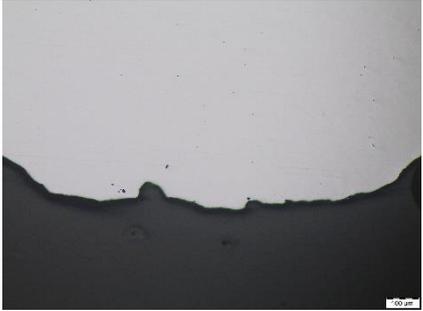
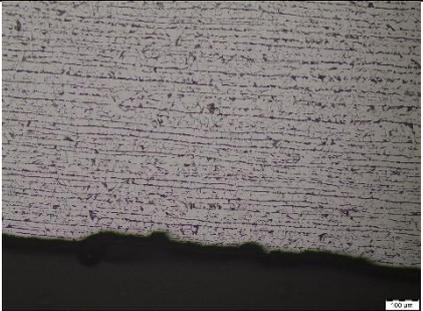
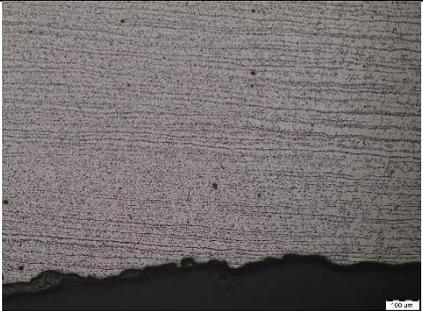
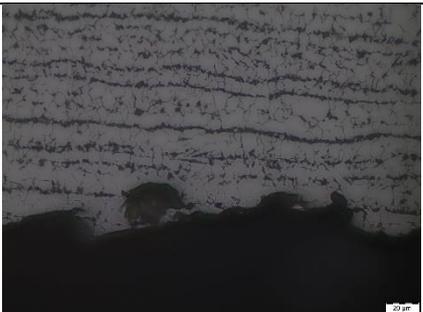
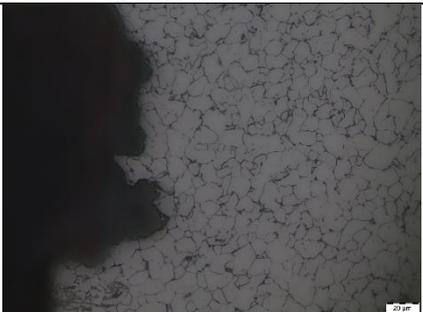
Probeta 593		
Material Base	Zona Afectada por el Calor	Material de Aporte
Sin Ataque Químico X100		
		
Con Ataque Químico X100		
		
Con Ataque Químico X500		
		

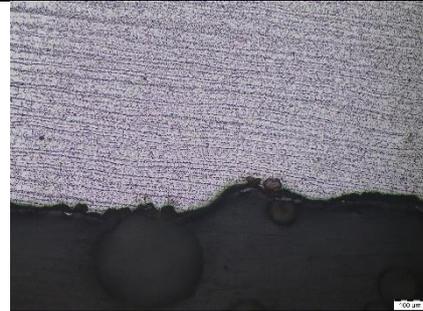
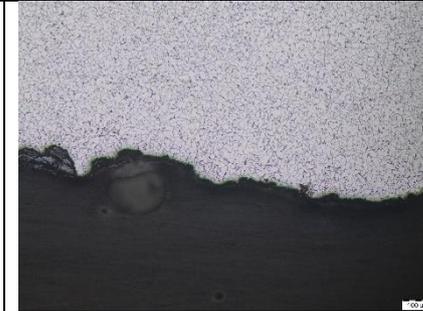
Probeta 601		
Material Base	Zona Afectada por el Calor	Material de Aporte
Sin Ataque Químico X100		
		
Con Ataque Químico X100		
		
Con Ataque Químico X500		
		

Probeta 602		
Material Base	Zona Afectada por el Calor	Material de Aporte
Sin Ataque Químico X100		
		
Con Ataque Químico X100		
		
Con Ataque Químico X500		
		

Probeta 603		
Material Base	Zona Afectada por el Calor	Material de Aporte
Sin Ataque Químico X100		
		
Con Ataque Químico X100		
		
Con Ataque Químico X500		
		

Probeta 691		
Material Base	Zona Afectada por el Calor	Material de Aporte
Sin Ataque Químico X100		
		
Con Ataque Químico X100		
		
Con Ataque Químico X500		
		

Probeta 692		
Material Base	Zona Afectada por el Calor	Material de Aporte
Sin Ataque Químico X100		
		
Con Ataque Químico X100		
		
Con Ataque Químico X500		
		

Probeta 693		
Material Base	Zona Afectada por el Calor	Material de Aporte
Sin Ataque Químico X100		
		
Con Ataque Químico X100		
		
Con Ataque Químico X500		
		