

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**ANÁLISIS DE FALLA CORRESPONDIENTE A UN CODO DE 2" DE
90° DE GRADO SANITARIO DE AISI SAE 304 L PERTENECIENTE A
UNA LÍNEA DE TRANSPORTE DE ÁCIDO CARMÍNICO**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecánico

AUTOR:

Eduardo Mejia Veramendi

ASESOR:

Dr. Carlos Abraham Fosca Pastor

Lima, Setiembre, 2024

Informe de Similitud

Yo, **CARLOS ABRAHAM FOSCA PASTOR**, docente de la Facultad de CIENCIAS E INGENIERÍA de la Pontificia

Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis/el trabajo de investigación titulado

ANÁLISIS DE FALLA DE UN CODO DE 90° DE 2" DE ACERO AISI-SAE 304L GRADO SANITARIO PERTENECIENTE A UNA LÍNEA DE TRANSPORTE DE ÁCIDO CARMÍNICO

Del autor:

EDUARDO MEJÍA VERAMENDI

dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de **19%**. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el **06/09/2024**.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y **no se advierte indicios de plagio**.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima, 06 de septiembre 2024

Apellidos y nombres del asesor: FOSCA PASTOR, CARLOS ABRAHAM Paterno Materno, Nombre1 Nombre 2	
DNI: 08739507	Firma 
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3340-3917	

RESUMEN

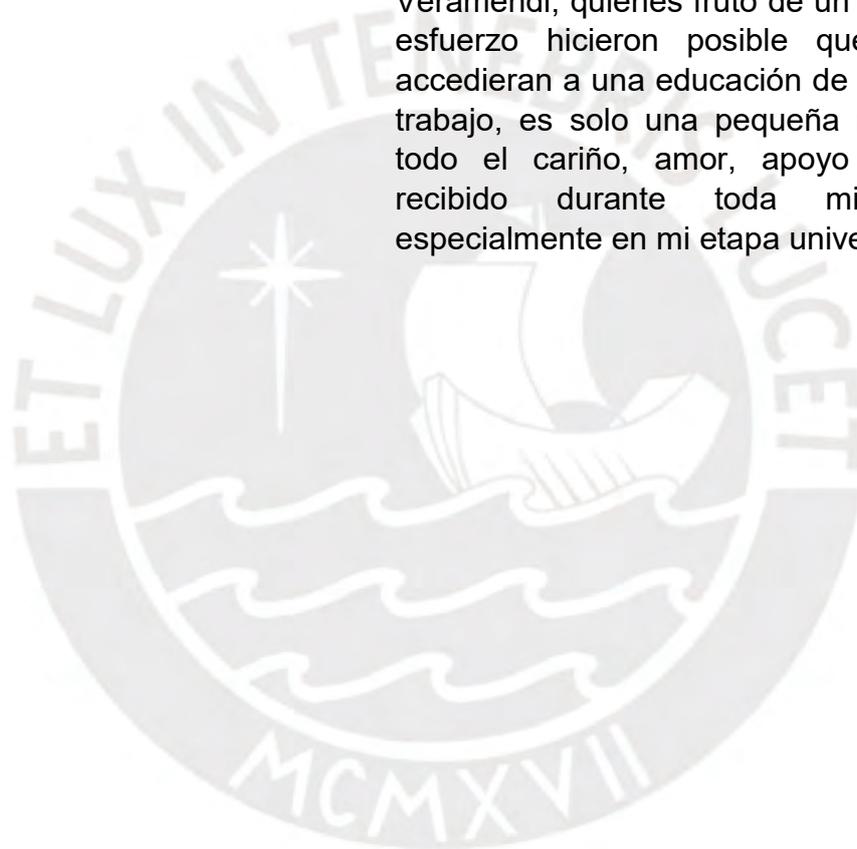
La presente investigación describe la metodología aplicada y los resultados obtenidos en el desarrollo del análisis de falla de un codo de 90° de 2" de diámetro de grado sanitario de un material AISI SAE 316L, la cual pertenecía a una línea de transporte de ácido carmínico al 2.5% en volumen, insumo usado para la fabricación de colorante rojo de origen natural, esta tuvo un tiempo de trabajo de aproximadamente 30 días, la que presentó una acelerada corrosión. Se ejecutaron diversos ensayos cuya finalidad fue determinar el mecanismo de falla y la causa más probable de la falla. Todos los ensayos realizados en la presente investigación han sido realizados en el laboratorio de Materiales de la Sección de Ingeniería Mecánica de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

En el primer capítulo los usos y aplicaciones del ácido carmínico, conceptos introductorios de los aceros inoxidable, así como los diferentes mecanismos de corrosión que afectan a estos, asimismo se presentan los conceptos previos acerca de la metodología de análisis de falla. En el segundo capítulo se presentan la metodología y también el procedimiento de los ensayos a realizar los cuales son inspección visual, análisis químico, análisis metalográfico, ensayo de polarización anódica y ensayos de reactivación electroquímica potenciocinética. El tercer capítulo presenta los resultados y el análisis de estos.

Finalmente, se concluye de los ensayos realizados que la causa de falla del componente de estudio corresponde a un mecanismo de corrosión intergranular, originado principalmente por una incorrecta ejecución de soldadura, asimismo también se concluye que el material no es el adecuado para el servicio, dado que según los ensayos el material no es congruente con la información suministrada. Adicionalmente, se plantean recomendaciones como un mejor control de calidad tanto en el material como en los procesos de soldadura.

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a mi padre, Mariano Mejia, y a mi madre, Susana Veramendi, quienes fruto de un inimaginable esfuerzo hicieron posible que sus hijos accedieran a una educación de calidad, este trabajo, es solo una pequeña retribución a todo el cariño, amor, apoyo y sacrificio recibido durante toda mi vida, y especialmente en mi etapa universitaria.



Agradecimiento

Mi agradecimiento especial a mis padres y mis hermanas, profesores, amigos y compañeros los cuales me acompañaron durante mi formación profesional.

A mi asesor el Dr. Carlos Fosca por su apoyo, paciencia y buen ánimo en el proceso de elaboración del presente trabajo de tesis.

Al Dr. Paul Lean y al Dr. José Sakihama por sus consejos, ánimos y apoyo para la culminación del presente trabajo de tesis.

A mis amigos y compañeros de INGESOLD y del laboratorio de materiales por su buena disposición para la realización de ensayos, preparación de muestras, análisis entre otros.

Por otra parte, agradecer, a la empresa SOMI S.A.C por su constante asistencia de diversas maneras (como realización de probetas, compras de insumos, material y entre otros). Y también agradecer profundamente la ayudada brindada por la empresa PRONEX S.A en la donación de ácido carmínico, el cual fue crucial para la culminación de este trabajo.

Finalmente, agradezco a todos mis amigos los cuales, de alguna manera u otra me apoyaron en la realización de este trabajo, con el cual doy por concluida mi etapa y formación en pregrado.

Tabla de contenido

INDICE DE TABLAS.....	v
INDICE DE FIGURAS.....	vi
INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS.....	2
1.Marco Teórico.....	3
1.1 Aceros Inoxidables	3
1.1.1 Características de los Aceros Inoxidables.....	4
1.1.2 Corrosión Electroquímicas	10
1.1.3 Curvas de Polarización	18
1.1.4 Técnicas Electroquímicas	20
1.2 Ácido Carmínico	24
1.3 Metodología de Análisis de Falla	29
1.3.1 Etapas de Análisis de Falla.....	30
1.3.2 Alcance de los Ensayos Realizados.....	31
2.Análisis de Falla del Componente.....	33
2.1 Inspección Visual	33
2.2 Análisis Químico	33
2.3 Análisis Metalográfico	34
2.4 Simulación Térmica	34
2.5 Curvas de Polarización	37
2.5.1 Curvas de Reactivación Electroquímica de Doble Lazo.....	37
2.5.2 Curvas de Polarización Anódica en Ácido Carmínico	40
3.Resultados y Análisis	42
3.1 Inspección Visual	42
3.2 Análisis Químico	45
3.3 Análisis Metalográfico	45
3.4 Simulación Térmica	52
3.5 Ensayo de Polarización (EPR - DL)	61
3.6 Curvas de Polarización Anódica	70
4.Conclusiones	76
5.Recomendaciones	77
6.Referencias	78

Índice de Tablas

	Pag.
Tabla 1.1.- Ejemplos de aceros inoxidable ferríticos resistentes a la corrosión. – Fuente Cesol.....	5
Tabla 1.2.- Ejemplos de aceros inoxidable dúplex resistentes a la corrosión. – Fuente Cesol.	7
Tabla 1.3.- Ejemplos de aceros inoxidable martensíticos resistentes a la corrosión. – Fuente Cesol.....	8
Tabla 1.4.- Cuadro resumen de los tipos de aceros inoxidable.....	9
Tabla 1.5 - Valor de exportación de diferentes colorantes naturales en Perú (2018 - 2022) - Extraído de "Colorantes Naturales: Evolución del Mercado Mundial y Nacional" por Centro de Investigación de Economía y Negocios Globales ".....	25
Tabla 1.6.- Principales países exportadores de carmín de cochinilla (2017-2021) – Extraído de “Análisis de Mercado de la cochinilla” por Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego.	26
Tabla 2.1.- Parámetros de soldadura empleados para la probeta de un pase.	34
Tabla 2.2.- Parámetros de soldadura empleados para 2 pases.....	35
Tabla 2.3.- Criterio de aceptación según norma ISO 12732 – 2006	38
Tabla 3.1.- Análisis Químico del codo*	45



Índice de Figuras

	Pag.
Figura 1.1 - Mercado de los Aceros Inoxidables – Tomado de: Cesol [1].....	1
Figura 1.2 - Microestructura de un acero inoxidable AISI 430 – Tomado de: Metallography and Microstructure of stainless steels and maraging steels [1].....	5
Figura 1.3 - Microestructura de un acero inoxidable AISI 316 L – Tomado de: Struers [2].....	6
Figura 1.4 – Microestructura de un acero Dúplex – Reactivo: Ataque electrolítico soda caustica – Tomado de: Struers [2].....	8
Figura 1.5- Esquema del Proceso GATW - Tomado del Manual del soldador [6].....	10
Figura 1.6 - Esquema del Proceso de Reducción y Oxidación - Tomado de la diplomatura de análisis de falla por Dr. Carlos Fosca [3].....	11
Figura 1.7 - Esquema de la interface “doble capa” – Tomado “Fundamentos del Análisis de falla” por Dr. Carlos Fosca. [7].....	12
Figura 1.8 - Esquema de formación de carburos de cromo - Tomado de “Corrosión intergranular en aceros inoxidables” de Ing. Forero Alvaro [8].....	14
Figura 1.9 - Variación del contenido de cromo a través del límite de grano – Tomado de “Corrosión intergranular en aceros inoxidables” de Ing. Alvaro Forero [8].....	14
Figura 1.10 - Variación del contenido de cromo a través del límite de grano – Tomado “ASM Handbook Corrosion Vol 13” [9].....	15
Figura 1.11 - Influencia del tamaño de grano sobre la resistencia a la corrosión intergranular – Tomado “Fundamentos del análisis de falla” por Dr. Carlos Fosca [3].....	16
Figura 1.12 – Microestructura de un acero AISI SAE 347 sensibilizado – Tomado de “Influence of post welding heat treatments on sensitization of AISI 347 SS welded joints” [10].....	17
Figura 1.13 - Esquema de la morfología de la formación de carburos de “zona de decaimiento” – Tomado “ASM Handbook Corrosion Vol 13” [9].....	18
Figura 1.14 – Curvas de polarización y las zonas características – Tomado de “Fundamentos de la corrosión para ingenieros” por Dr. Carlos Fosca [11].....	19
Figura 1.15 - Esquema de la celda Electroquímica – Tomado de la Norma ASTM G5 [12]...	20
Figura 1.16 - Curva de polarización electroquímica en el sentido anódico – Tomado de “Fundamentos de la corrosión para ingenieros” por Dr. Carlos Fosca [11].....	21
Figura 1.17 - Curva de polarización anódica para un metal en estado activo (curva roja) y un metal en estado pasivo (curva azul) – Tomado de “Fundamentos de la corrosión para ingenieros” por Dr. Carlos Fosca [11].....	22
Figura 1.18 - Curvas de polarización esquemática del método de prueba EPR doble bucle – Tomado de ISO 12732 [13].....	24
Figura 1.19 - Hojas de tuna (Opuntia picus cactil) infestada de la cochinilla (Dactylopus cocus costa) usados para la crianza y producción de ácido carmínico – extraído de Catálogo de maquinaria para procesamiento de Cochinilla [18].....	25
Figura 1.20 – Variación del color del ácido carmínico en función del pH – Tomado de “An Advanced Spectroscopy Lab That Integrates Art, Commerce, and Science as Students Determine the Electronic Structure of the Common Pigment Carminic Acid” [22].....	27
Figura 1.21 - Efecto de ácidos orgánicos en tuberías de diferentes materiales – Tomado de “Corrosion Handbook for Stainless Steels” por Avesta Sheffield [23].....	28

Figura 2.1 - Esquema de probeta a soldar.....	35
Figura 2.2 - Esquema de la ubicación de las probetas a ensayar.....	36
Figura 2.3 - Esquema de las curvas de polarización electroquímica potenciocinética.....	37
Figura 2.4 - Esquema de la ubicación de las probetas a ensayar.....	39
Figura 2.5 – Celda Electroquímica y Potencioestado.....	39
Figura 3. 1 - Componente de Estudio.....	42
Figura 3.2 - Vista de la Zona del cordón de la Soldadura.....	43
Figura 3.3 - Vista de mayor detalle de corrosión.....	44
Figura 3. 4 - Vista de Estereoscopio de la fisura que atraviesa longitudinalmente el codo en estudio.....	44
Figura 3. 5 - Metalografía el metal base con ataque – 200X – Reactivo: ácido oxálico.....	46
Figura 3.6 - Sección a extraer del cordón longitudinal.....	46
Figura 3.7 - Vista frontal de la sección.....	47
Figura 3.8 - Sección atacada de la corrosión longitudinal – 50X – Reactivo: ácido oxálico...47	47
Figura 3.9 - Sección próxima a la costura del codo – 50X – Reactivo: ácido oxálico.....	48
Figura 3.10 - Detalle “A” de picadura en la parte interna del componente de estudio en contacto con ácido carmínico – 200X – Reactivo: ácido oxálico.....	49
Figura 3.11 - Sección correspondiente de la corrosión circunferencial.....	49
Figura 3.12 - Vista de la microestructura en la unión codo – tubería - 50X- Reactivo: ácido oxálico.....	50
Figura 3.13 - Vista de la sección corroída – 200X – Reactivo: ácido oxálico.....	50
Figura 3.14 - Sección donde se muestra el cambio en la morfología – 100X – Reactivo: ácido oxálico.....	51
Figura 3. 15 - Esquema de la Secuencia de Soldeo.....	52
Figura 3.16 - Curvas de enfriamiento en la ubicación de 0° a diferentes distancias – 1 pase.....	53
Figura 3.17-Curvas de enfriamiento en la ubicación de 0° a diferentes distancias – 2 pases.....	53
Figura 3.18 - Curvas de enfriamiento en la ubicación de 90° a diferentes distancias – 1 pase.....	54
Figura 3.19 - Curvas de enfriamiento en la ubicación de 90° a diferentes distancias – 2 pases.....	54
Figura 3. 20 - Curvas de enfriamiento en la ubicación de 180° a diferentes distancias – 1 pase.....	55
Figura 3. 21 - Curvas de enfriamiento en la ubicación de 180° a diferentes distancias – 2 pases.....	55
Figura 3. 22 - Curvas de enfriamiento en la ubicación de 270° a diferentes distancias – 1 pase.....	56
Figura 3. 23 - Curvas de enfriamiento en la ubicación de 270° a diferentes distancias – 2 pases.....	56
Figura 3. 24 - Variación de la temperatura, grado de precipitación (DOP) y grado de sensibilización (DOS) correspondiente al punto “C” - Tomado de “New Numerical model to predict welding-induced sensitization in SUS304 austenitic stainless Steel joint” por Guangjie [36].....	57
Figura 3. 25 - Variación de la temperatura, grado de precipitación (DOP) y grado de sensibilización (DOS) correspondiente al punto “E” - Tomado de “New Numerical model to predict welding-induced sensitization in SUS304 austenitic stainless Steel joint” por Guangjie [36].....	58
Figura 3.26 - Distribución de la temperatura - Tomado de “New Numerical model to predict welding-induced sensitization in SUS304 austenitic stainless Steel joint” por Guangjie Feng [36].....	60

Figura 3.27 - Variación del grado de sensibilización a 3 mm.	61
Figura 3.28 - Microestructura a 3 mm y ubicación 180° - 500X – Reactivo: ácido oxálico.....	61
Figura 3.29 - Variación del grado de sensibilización a 4 mm.	62
Figura 3.30 - Microestructura a 4 mm y ubicación 180° - 500X - Reactivo: ácido oxálico.	62
Figura 3.31 - Variación del grado de sensibilización a 5 mm	63
Figura 3.32 - Microestructura a 5 mm y ubicación 180° - 500X - Reactivo: ácido oxálico.	63
Figura 3.33 - Variación del grado de sensibilización a 6mm.	64
Figura 3.34 - Microestructura a 6 mm y ubicación a 180° - 500X – Reactivo: ácido oxálico..	64
Figura 3. 35 - Variación del grado de sensibilización a diferentes distancias.....	65
Figura 3.36 – Variación en las microestructuras del grado de sensibilización en un acero AISI SAE 347 – Tomado de Application of Double Loop Electrochemical Potentio-kinetic Reactivation for characterizing the intergranular corrosion susceptibility of stainless steels and Ni-based alloys in solar nitrate salts used in CSP systems [37].	66
Figura 3. 37 - Componente de estudio	67
Figura 3. 38 - Variación del grado de sensibilización en función de la distancia y con un aporte de calor de 0.9 kJ/mm - Tomado de “Influencia das variaveis e do proceso de soldagem na sesitizao dos acos inoxidáveis austeníticos por acos inoxidáveis austeníticos” por Sousa Luz [14].	68
Figura 3. 39 - Variación del grado de sensibilización en función a la distancia y con un aporte de calor de 1.1 kJ/mm - Tomado de “Influencia das variaveis e do proceso de soldagem na sesitizao dos acos inoxidáveis austeníticos por acos inoxidáveis austeníticos” por Sousa Luz [14].	68
Figura 3. 40 - Variación del grado de sensibilización en función a la distancia con un aporte de calor de 1.2kJ/mm - Tomado de “Influencia das variaveis e do proceso de soldagem na sesitizao dos acos inoxidáveis austeníticos por acos inoxidáveis austeníticos” por Sousa Luz [14].....	69
Figura 3.41 - Curvas de Polarización Anódica del AISI SAE 304 L sano y sensibilizado.	70
Figura 3.42 - Curvas de Polarización Anódica del AISI SAE 316 L.....	70
Figura 3.43 - Microestructura de la probeta de AISI SAE 316 L 100X – Reactivo: ácido oxálico	72
Figura 3.44 - Microestructura de la probeta de AISI SAE 304 L con 2 pases – 100X – Reactivo: ácido oxálico	73
Figura 3.45 - Microestructura de la probeta de AISI SAE 304 L con 1 solo pase – 100X – Reactivo: ácido oxálico.....	73
Figura 3.46 - Microestructura del SAE 304 L y cordón de soldadura con un solo pase 100X – reactivo: ácido carmínico.....	74

Introducción

El ácido carmínico se emplea como materia prima para la fabricación de colorante de color rojo, el cual tiene aplicación en las industrias alimentarias, cosmética, textil y otras. Este es soluble en agua y no es tóxico para consumo humano y posee un pH variable de acuerdo con la coloración que se desea obtener. Este se obtiene de la cochinilla, un insecto que vive como huésped en la Opuntia Ficus Indica, conocida comúnmente como Tuna, y se desarrolla parasitariamente en las pencas de este, estas son originarias de Chile, México y Perú.

El Perú es el principal exportador de carmín de cochinilla, materia principal para obtener ácido carmínico, carmín, carmín en laca y otros derivados que se emplean para la producción de colorante color rojo, esto toma mayor relevancia cuando se observa que las tendencias actuales buscan reemplazar los colorantes sintéticos por aquellos de origen natural, y es que de acuerdo con el Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego el Perú cubre casi el 80% de la demanda a nivel mundial.

En el marco de lo anteriormente expuesto, se debe garantizar que todo el proceso de producción y obtención de esta materia prima debe darse con los controles de calidad necesarios, para garantizar la calidad del proceso, más aún que en los últimos meses se han detectado varias fallas muy críticas en las líneas de producción de estas plantas, que trabajan con esta materia prima y/o derivados, para las cuales se deberá realizar una investigación denominada "Análisis de Falla", que tiene como objetivo determinar la falla de un componente, y con esta información evitar que sucedan nuevamente.

La presente tesis muestra un caso de análisis de falla realizado a un codo de 90° de 2" de diámetro la cual formaba parte de una línea principal que transportaba ácido carmínico, teniendo como principal objetivo determinar la causa más probable que genero la falla de este componente.

Adicionalmente, se plantea que esta tesis pueda ser empleada como texto ayuda en empresas y/o plantas nacionales que trabajen con este insumo para la fabricación de colorante rojo de origen natural y así evitar pérdidas económicas.

Objetivos

Objetivo general

Determinar la causa más probable que originó la falla en el codo de 90° de 2" de diámetro de grado sanitario, la cual pertenecía a una línea de transporte de ácido carmínico, empleado para la fabricación de cosméticos.

Objetivos específicos

- Caracterizar el material con el cual se ha fabricado el codo.
- Determinar el modo de falla que originó la falla del elemento.
- Determinar si el proceso de soldadura para la unión codo – tubería ha sido el adecuado.



1. Marco Teórico

1.1 Aceros Inoxidables

Los aceros inoxidables son aleaciones complejas las cuales están constituidas por hierro, cromo y níquel principalmente. El desarrollo original de estos aceros, los cuales se usan hasta la fecha, comenzó previo a la primera guerra mundial, tanto en Inglaterra y Alemania. El inglés Harry Brearley investigando cómo proteger los cilindros de los cañones, encontró que, con la adición de cromo a los aceros de bajo carbono, obtenía aceros resistentes a la oxidación. Los doctores Strauss y Maurer, de Alemania, en 1912 patentaron dos grupos de aceros inoxidables al cromo-níquel de bajo contenido de carbono. Uno de estos, con la denominación 18-8, ha sido utilizado desde entonces en numerosas aplicaciones. [1]

Si bien en un inicio se tenían una muy reducida lista de materiales creados durante este contexto, incluso estos primeros materiales se tenían en secreto dado el contexto de la guerra. En la actualidad existen una gran variedad de aceros inoxidables y tienen un muy amplio uso en diferentes industrias dada su buena resistencia contra la corrosión y algunas propiedades características como se muestra en la figura 1.1.



Figura 1.1 - Mercado de los Aceros Inoxidables – Tomado de: Cesol

Según la Norma UNE-EN 10088-1: Aceros inoxidables, los aceros inoxidables son aquellos que contienen, al menos, un 10,5% de cromo y un máximo de 1,2% de carbono, sin embargo, se ha considerado, de manera general, que un acero inoxidable es aquel que contiene, como mínimo, un 12% de Cr [1].

En general el acero inoxidable tiene como principal característica una alta resistencia a la corrosión, esto se debe a la formación de una capa de óxido de cromo, adherente,

en la superficie, esta capa se denomina capa pasiva, la cual si bien es una capa que puede ser removida este puede volver a generarse en un periodo corto.

Como bien se ha mencionado, estos son usados en una gran variedad de aplicaciones, de manera general la norma UNE-EN 10088-1, clasifica de 2 maneras a los aceros inoxidable.

- En función de su uso:
 - Aceros resistente a la corrosión.
 - Aceros refractarios.
 - Aceros resistentes a la fluencia (creep).
- En función de su estructura:
 - Aceros Inoxidables austeníticos
 - Aceros inoxidable ferríticos
 - Aceros inoxidable dúplex
 - Aceros inoxidable martensíticos

De acuerdo con la norma indicada previamente considera adicionalmente un grupo más dentro de la calificación de los aceros según su estructura y estos son los “Aceros endurecibles por precipitación”, varios autores consideran estos dentro de los grupos de dúplex o martensíticos.

1.1.1 Características de los aceros inoxidable

A continuación, se mencionará los puntos más importantes, según su estructura.

1.1.1.1 Aceros inoxidable ferríticos

Estos aceros tienen una estructura de ferrita delta, estructura atómica cúbica centrada en el cuerpo, magnética y posee una temperatura de transición dúctil – frágil característica, tienen una resistencia a la corrosión baja en comparación a los aceros inoxidable austeníticos, y poseen una soldabilidad entre moderadas y mediocre. No es endurecible por tratamiento térmico. Entre algunos ejemplos de aceros inoxidable ferríticos se presenta la tabla 1.1.

Tabla 1.1 - Ejemplos de aceros inoxidable ferríticos resistentes a la corrosión. – Fuente Cesol [1].

Designación del acero	% en masa							
	C	Si	Mn (max)	P (max)	S (max)	Cr	Al	Otros
1.4724	≤0.12	0.7 a 1.4	1	0.04	0.015	12 a 14	0.7 a 1.2	-
1.4742	≤0.12	0.7 a 1.4	1	0.04	0.015	17 a 19	0.7 a 1.2	-
1.4762	≤0.12	0.7 a 1.4	1	0.04	0.015	23 a 26	1.2 a 1.7	-
1.4749	0.15 a 0.2	≤ 1	1	0.04	0.015	26 a 29	-	N : 0.15 a 0.25

Adicionalmente de los mostrados anteriormente también tenemos a los aceros AISI SAE 405, 409, 430, entre otros. También es importante mencionar que la UNE-EN 10088-1, divide los aceros inoxidable ferríticos en 2 subgrupos los cuales son los aceros resistentes a la corrosión y aceros refractarios, a continuación, se muestra en la figura 1.2 la microestructura de un acero inoxidable AISI 430.

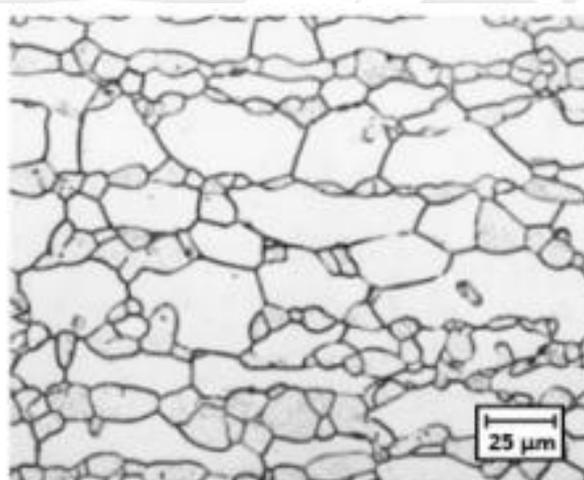


Figura 1.2 - Microestructura de un acero inoxidable AISI 430 – Tomado de: Metallography and Microstructure of stainless steels and maraging steels [1].

1.1.1.2 Aceros Inoxidables Austenítico

Esta familia de aceros inoxidable tiene una estructura de grano austenítico, estructura atómica cúbica centrada en las caras, no es magnético y es dúctil hasta en un rango de temperaturas bastante bajo como temperaturas criogénicas, tiene un contenido de cromo entre 16% a 25% de cromo, y contenidos de níquel que varía de 8 % a 37%. No es endurecible con tratamiento térmico, posee una buena soldabilidad siendo necesario controlar la composición del metal de aporte y la dilución. Es importante mencionar que el acero inoxidable austenítico presenta una conductividad

térmica aproximadamente un 40% inferior y un coeficiente de dilatación aproximadamente un 50% más elevado que la del acero al carbono (variables que tienen un importante rol en el proceso de soldadura). Respecto a su resistencia a corrosión los aceros inoxidables austeníticos se caracterizan por tener una buena resistencia a la acción de agentes atmosféricos, mejor resistencia frente a medios ácidos y también en elevadas temperaturas. Se emplean principalmente para elementos decorativos, en elementos de hornos y calderas, y para aplicaciones sanitarias en general. UNE-EN 10088-1 adicionalmente clasifica a los aceros inoxidables austeníticos en 3 grupos los cuales son “Aceros inoxidables resistentes a la corrosión”, “Aceros inoxidables austeníticos refractarios” y “Aceros inoxidables austeníticos resistentes a la fluencia”.

Adicionalmente las normas ASTM los tipos de aceros austeníticos con contenidos en manganeso iguales o inferiores a 2% se clasifican en las series 300 [2]. En dicho grupo están los AISI SAE 304, 304L, 316, 316L (los cuales los mencionados anteriormente tienen un amplio uso en la industria para los diferentes procesos de transporte de productos) ,321, 347 entre otros, se muestra en la figura 1.3 la microestructura de un acero inoxidable AISI SAE 316L.

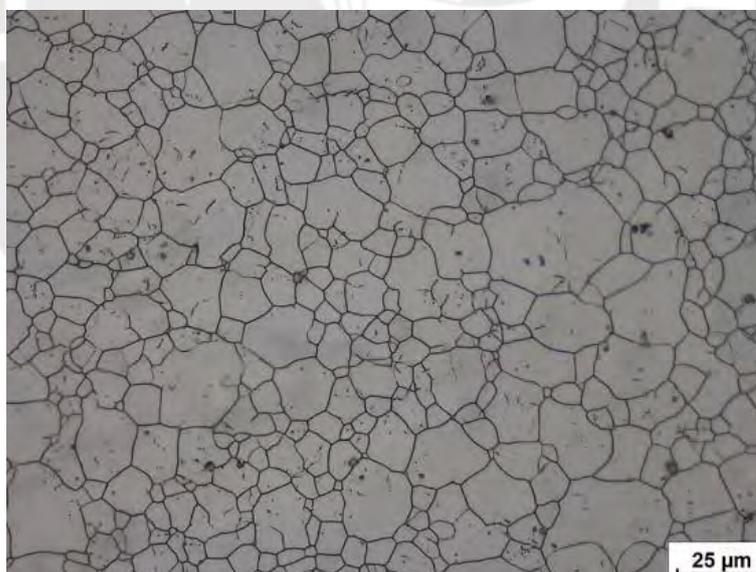


Figura 1.3 - Microestructura de un acero inoxidable AISI 316 L – Tomado de: Struers [3].

1.1.1.3 Aceros inoxidables dúplex.

Estos aceros poseen una estructura bifásica (microestructura de austenita y ferrita) con contenidos de ferrita que varían entre un 30% hasta 50%. Las propiedades mecánicas de estos aceros son más elevadas en comparación a los aceros austeníticos y los ferríticos, descritos previamente. Entre algunos ejemplos de los aceros inoxidables dúplex se presenta la tabla 1.2.

Tabla 1.2 - Ejemplos de aceros inoxidables dúplex resistentes a la corrosión. – Fuente Cesol [1].

Designación	% en Masa							
	C _{máx}	Si	Mn	N	Cr	Cu	Mo	Ni
1.4362	0.03	≤1	≤2	0.05 a 0.2	22 a 24	0.1 a 0.6	0.1 a 0.6	3.5 a 5.5
1.4655	0.03	≤1	≤2	0.05 a 0.2	22 a 24	1 a 3	0.1 a 0.6	3.5 a 5.5
1.4460	0.05	≤1	≤2	0.05 a 0.2	25 a 28	-	1.3 a 2	4.5 a 6.5
1.4477	0.03	≤0.5	0.8 a 1.5	0.3 a 0.4	28 a 30	≤0.8	1.5 a 2.6	5.8 a 7.5
1.4462	0.03	≤1	≤2	0.1 a 0.22	21 a 23	-	2.5 a 3.5	4.5 a 6.5
1.4507	0.03	≤0.7	≤2	0.2 a 0.3	24 a 26	1 a 2.5	3 a 4	6 a 8
1.4410	0.03	≤1	≤2	0.24 a 0.35	24 a 26	-	3 a 4.5	6 a 8
1.4501(*)	0.03	≤1	≤1	0.2 a 0.3	24 a 26	0.5 a 1	3 a 4	6 a 8
1.4424	0.03	1.4 a 2	1.2 a 2	0.05 a 0.1	18 a 19	-	2.5 a 3.5	4.5 a 5.2

(*) %W de 0.5 a 1. En todos los aceros %P_{máx} 0.035 y %S_{máx} 0.015

Adicionalmente de los mostrados anteriormente también se tiene los aceros AISI SAE 312, 329, entre otros.

Estos aceros son magnéticos, presentan una buena resistencia a la corrosión y una buena soldabilidad. No son endurecibles por tratamiento térmico. La UNE-EN 10088-1 clasifica en dos grupos a los aceros inoxidables dúplex los cuales son “Aceros Inoxidables Dúplex Resistentes a la Corrosión” y “Aceros Inoxidables Dúplex Refractarios”. Se muestra en la figura 1.4 la microestructura de un acero dúplex.



Figura 1.4 – Microestructura de un acero Dúplex – Reactivo: Ataque electrolítico soda caústica – Tomado de: Struers [3].

1.1.1.4 Aceros Inoxidables Martensíticos

Estos aceros poseen una estructura martensítica, la cual posee una alta resistencia mecánica, además presentan una baja soldabilidad, son magnéticos y se endurecen al enfriarse al aire. Estos aceros tienen un contenido de carbono entre 0.08 % a 1%. Entre algunos ejemplos de los aceros inoxidables martensíticos se presente la tabla 1.3

Tabla 1.3 - Ejemplos de aceros inoxidables martensíticos resistentes a la corrosión. – Fuente Cesol [1].

Designación	% en Masa						
	Cmax	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Otros
1.4005(*)	0.08 a 0.15	1	≤1.5	12 a 14	≤0.6	-	-
1.4006	0.08 a 0.15	1	≤1.5	11.5 a 13.5	-	≤0.75	-
1.4313	≤0.05	0.7	≤1.5	12 a 14	0.3 a 0.7	3.5 a 4.5	N≤0.02
1.4418	≤0.06	0.7	≤1.5	15 a 17	0.8 a 1.5	4 a 6	N≤0.02
1.4415	≤0.03	0.5	≤0.5	11.5 a 13.5	1.5 a 2.5	4.5 a 6.5	V 0.1 a 0.2
1.4109	0.6 a 0.75	0.7	≤1	14 a 16	0.4 a 0.8	-	-

(*) %S 0.10 a 0.35. En todos los demás %P_{max} 0.04 y %S_{max} 0.015

La UNE-EN 10088-1 clasifica los aceros inoxidables martensíticos en dos grupos los cuales son “Aceros Inoxidables Martensíticos Resistentes a la Corrosión” y “Aceros Inoxidables Martensíticos Resistentes a la Fluencia”, por otro lado, se pueden clasificar de manera general en la serie AISI SAE 400 como el 410 y 420.

A continuación, se presentan en la tabla 1.4, un cuadro resumen con los aceros anteriormente mencionados, con sus principales características.

Tabla 1.4 - Cuadro resumen de los tipos de aceros inoxidables.

Tipo	Austeníticos	Ferríticos	Dúplex	Martensíticos
Elementos Básico	C \leq 0.15% Cr entre 16 a 27% Ni entre 8 a 31%	C ente 0.01-0.35 % Cr entre 16 a 28 %	C \leq 0.05% Cr entre 18 - 25 % Ni entre 3 - 6 % Mo entre 0 - 4 % N entre 0.1 - 0.5%	C entre 0.1 -1.4 % Cr entre 12 - 20 % Ni entre 0 - 4 %
Otros Elementos	Mn, Si, P, S, Ti, Cu, N, W, Al, V añadidos o residuales	Mn, Si, P, S, Mo, Cu, Ti, Nb añadidos o residuales	Mn, Si, P, S, Cu añadidos o residuales	Mn, Si, P, S, Mo, Cu, Al añadido o residuales
Comentarios	- Son el 95 % de aceros usados en la industria - No Son magnéticos	- Son magnéticos. - Menor resistencia a la corrosión que los austeníticos	- Son magnéticos. - Tradicionalmente tiene ferrita entre 40 a 60 %. - No se endurecen con tratamiento térmico	- Son magnéticos - Presentan propiedades mediocres de soldabilidad y resistencia a la corrosión

Si bien en la tabla 1.4 se muestran, de manera resumida, las características de los diferentes tipos de aceros inoxidables que existen, se considera adecuado desarrollar algunos puntos importantes respecto a su soldabilidad, sobre todo en los aceros inoxidables austeníticos.

Si bien estos materiales pueden soldarse con las diferentes técnicas de soldadura que existen, se describirá el proceso más usado para estos, y también el que se empleó en el componente de estudio (indicado más adelante) el cual corresponde al denominado proceso de soldeo GTAW: Gas Tungsten Arc Welding de acuerdo a la norma *AWS A3.0: Terminología y Definiciones* [4] podemos definirla como “Un proceso de soldadura por arco que utiliza un arco entre un electrodo de tungsteno (no consumible) y el charco de soldadura. El proceso se utiliza con gas protector y sin la aplicación de presión”.

Entre las ventajas que se presente este proceso con respecto a los demás se presentan [5]:

- Genera un arco estable y concentrado.
- No produce escoria.
- Se consiguen soldadura de gran calidad
- No produce humos.

A continuación, se presenta el esquema del proceso de soldeo GTAW, es importante mencionar que, en este, se incluye material de aporte.

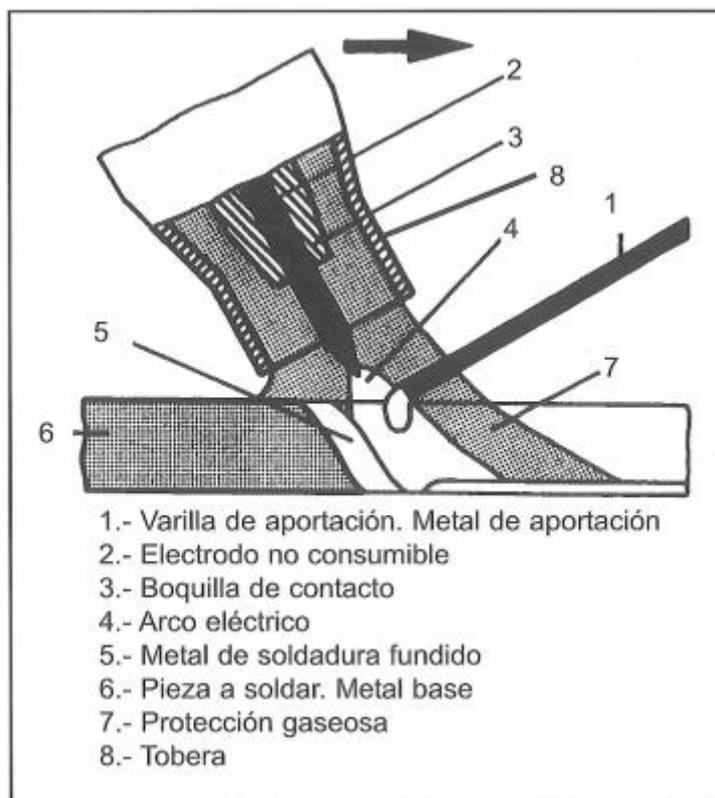


Figura 1.5 – Esquema del proceso GTAW – Tomado de: Manual del Soldador [6]

De manera general la soldabilidad de los aceros inoxidables austeníticos es buena, y aunque estos puedan presentar un inconveniente típico como lo es la fisuración en caliente [6], este no será abordado en el presente trabajo, sino más bien nos centraremos en los relacionados con los fenómenos de corrosión, motivo por el cual se presentan.

1.1.2 Corrosión Electroquímica

De manera general los metales se encuentran en forma de compuestos (óxidos, sulfuros entre otros), solo los denominados “metales nobles” se encuentran en un estado puro en la naturaleza, para los otros metales deben ser sometidos a un proceso de reducción para poder obtenerlos. La corrosión se define como el deterioro de un material (un metal) como resultado de la reacción química o electroquímica entre él y su ambiente [7]. La corrosión retorna a la mayoría de los metales a su estado nativo formando compuestos químicos.

Estos se pueden clasificar en dos grandes grupos según el medio que puede clasificarse como “corrosión electroquímica” y “corrosión seca”, sin embargo, para el presente estudio se centrará en los mecanismos asociados a la corrosión electroquímica.

Si bien en un inicio se mencionó la resistencia que poseen los aceros inoxidable ante estos fenómenos, la gran mayoría de los materiales aplicados en ingeniería son propensos a este tipo de corrosión, para este tipo de fenómenos es necesario que existan cuatro elementos los cuales son un ánodo (zona que sufre corrosión), cátodo, un medio electrolítico y contacto eléctrico. Este mecanismo involucra 2 grupos de semi-reacciones, una de oxidación (ánodo) y otra de reducción (cátodo), como se muestra de manera esquemática en la figura 1.6, la cual se pueden entender como flujo de electrones desde el ánodo hacia el cátodo, pero también esta puede expresarse desde un punto de vista termodinámico, la corrosión de un metal ocasiona una disminución de su energía libre (ΔG), este cambio en la energía libre también se puede expresar como:

$$\Delta G = -nFE$$

Donde:

- 2 n: # de electrones transferidos
- 3 F: Constante de Faraday
- 4 E: Potencial Electroquímico

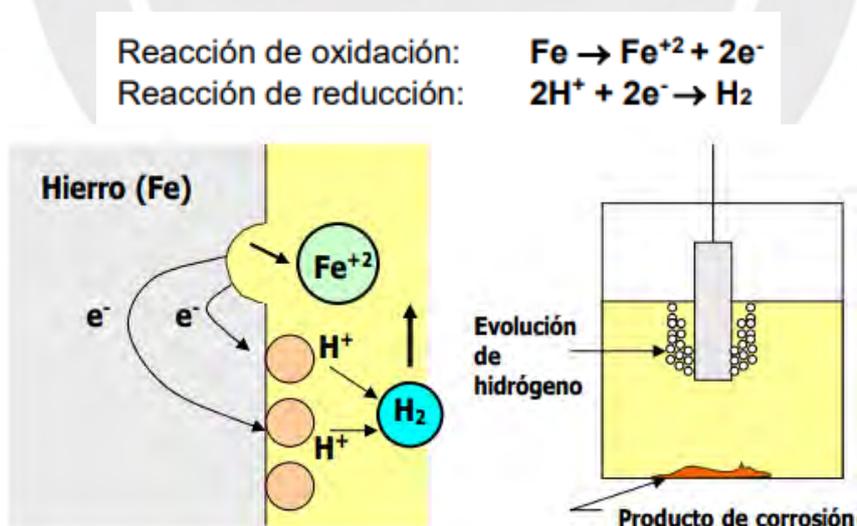


Figura 1.6 - Esquema del Proceso de Reducción y Oxidación - Tomado de la diplomatura de análisis de falla por Dr. Carlos Fosca [3].

De esta manera se podrá relacionar la variación de energía libre con el potencial electroquímico. Como se mencionó anteriormente entre los factores necesarios,

cuando entra en contacto un metal con un medio acuoso se inicia un proceso de movilidad de electrones en diferentes puntos de la superficie sumergida, este movimiento genera un incremento de la carga eléctrica en la superficie del metal, y esto atrae cargas del signo opuesto que se encuentran en el electrolito provocando la formación de una estructura interface denominada “doble capa”, como se presenta en la figura 1.7.

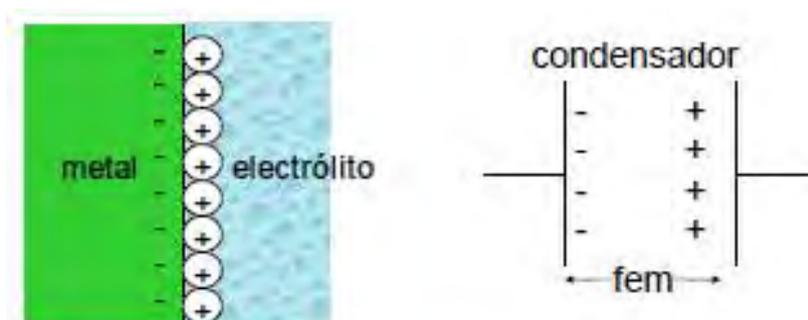


Figura 1.7 - Esquema de la interfase “doble capa” – Tomado “Fundamentos del Análisis de falla” por Dr. Carlos Fosca. [7].

Es importante mencionar que los potenciales electroquímicos no son valores absolutos, sino que deben ser medidos con relación a un potencial de referencia conocido como estándar. Adicionalmente, todo metal y/o aleación contiene heterogeneidades, las cuales generan regiones termodinámicamente más activas que otras, produciendo así zonas catódicas y zonas anódicas. Entre las heterogeneidades microscópicas tenemos precipitados, segregaciones, límites de granos o inclusiones no metálicas, y de manera macroscópica discontinuidades en la película protectora, diferencias en el acabado superficial o regiones fuertemente deformadas.

Entre los diferentes mecanismos que corrosión electroquímica se presentan a continuación:

1.1.2.1 Corrosión uniforme

Es la forma más común de corrosión, el deterioro se ve de manera homogénea sobre toda la superficie metálica, este mecanismo es el menos severo de todos los presentes.

1.1.2.2 Corrosión por picaduras

Mecanismo de corrosión que se caracteriza por un ataque muy localizado, sin una aparente pérdida de peso, pero con una fuerte penetración al interior del material el

cual puede poner en riesgo la integridad estructural del componente. Este tipo de corrosión se presente principalmente en aleaciones pasivables (son las aleaciones que forman una capa pasiva que las protege de la corrosión uniforme) como en el caso de los aceros inoxidable, como en el caso de soluciones neutras y ácidas, conteniendo cloruros.

1.1.2.3 Corrosión por resquicios

Este mecanismo de corrosión se presenta en las uniones, intersticios, zonas traslapadas, y de manera general en zonas mal aireadas. Este tipo de corrosión se da en todas las aleaciones como por ejemplo en los aceros inoxidable y en ambientes marinos.

1.1.2.4 Corrosión bajo tensión

Mecanismo de corrosión que se presente en aleaciones las cuales están sometidas a un medio corrosivo y esfuerzos mecánicos de tracción. Este tipo de corrosión provoca que materiales los cuales de manera natural presentan un comportamiento dúctil se comporten totalmente frágil. La corrosión bajo tensión provoca la nucleación y crecimientos de fisuras, las cuales estas pueden ser de naturaleza intergranular o transgranular.

Este fenómeno es de los más importantes para los aceros inoxidable austeníticos (en materiales tanto sensibilizados como en los que no) por encima de los 60 °C, adicionalmente se tienen registro de casos en aceros sensibilizados para concentraciones bajas de NaOH (soda cáustica) para temperaturas mayores a 100 °C.

1.1.2.5 Corrosión Intergranular

Este fenómeno de corrosión en particular fue inicialmente descrito y explicado por autores como Bain y otros en 1933, se explica que cuando ciertos aceros austeníticos son sometidos a ciertas condiciones, se generarán precipitados de carburos de cromo (presencia de fases secundarias) en los límites de grano, empobreciendo de cromo las zonas de alrededor, eliminando así el mecanismo de protección de corrosión propio de estos aceros que a su vez producen diferencias de potenciales entre los límites de grano y resto de la aleación. Este tipo de corrosión, localizada, está asociada a factores metalúrgicos (que pueden ser segregaciones de elementos aleantes, precipitación de fases secundarios como son carburos fase sigma u entre

otros). Entre los factores que influyen principalmente son las condiciones de temperatura, tiempo y composición (sobre todo en el % de carbono), a continuación, se indican:

- Temperatura

Si bien el rango de temperaturas puede variar en función de la composición del acero, varios autores de manera general indican que para los aceros austeníticos sometidos a temperaturas entre 650 y 800 °C, se pueden generar la posibilidad que se precipiten principalmente carburos Cr_{23}C_6 , empobreciendo zonas cercanas reduciendo el contenido de cromo hasta en 2 a 3 %, como se presentan en la figura 1.8 y 1.9. Es importante mencionar que a temperaturas menores no se genera el fenómeno de difusión de cromo, y que a temperaturas mayores la difusión es tan elevada que se homogeniza evitando así la sensibilización.

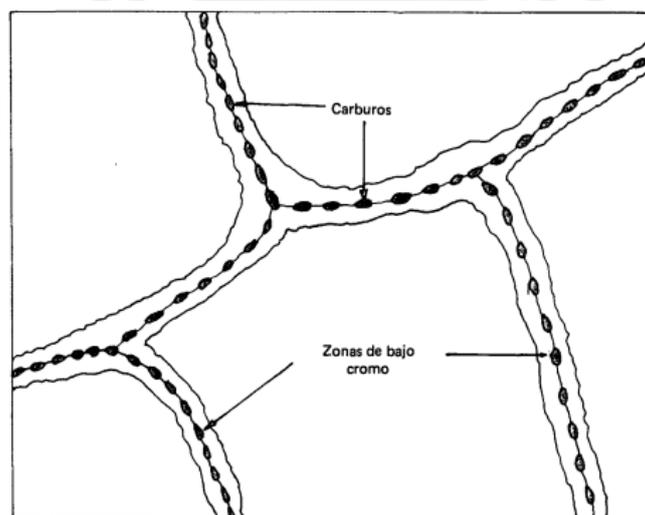


Figura 1.8 - Esquema de formación de carburos de cromo - Tomado de “Corrosión intergranular en aceros inoxidables” de Ing. Forero Alvaro [8].

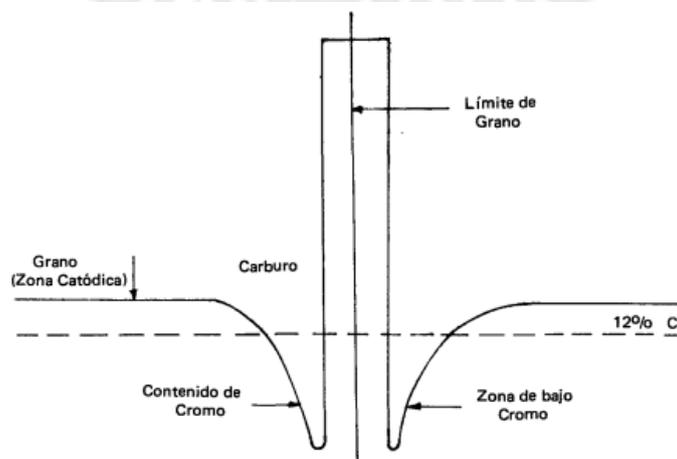


Figura 1.9 - Variación del contenido de cromo a través del límite de grano – Tomado de “Corrosión intergranular en aceros inoxidables” de Ing. Alvaro Forero [8].

- Tiempo

Este otro factor es determinante, ya que el cromo tiene mayor tendencia a formar solución sólida que a formar carburos, si bien este rango de temperaturas, donde tiende a precipitar, puede ser bastante amplio, y si bien este tiende a reducirse cuando enfriamos rápidamente se genera un efecto adverso, debido que el mecanismo de precipitación también se acelera a temperaturas cercanas a 680 °C, el resultado es que la formación de carburo se puede dar en muy cortos tiempos. En procesos de soldadura esta variable es importante dado que la precipitación puede darse en fracciones de minutos.

- Composición Química

De manera general en los aceros austeníticos solo es necesario tener un 16% de cromo y un 0.1% de carbono para que este sea sensibilizado, cumpliendo las condiciones anteriores, sin embargo en la actualidad se ha reducido en gran medida el contenido de carbono para evitar este mecanismo de corrosión, adicionalmente una manera de evitar la sensibilización es empleado acero austeníticos como los “estabilizados” los cuales poseen titanio el cual forma carburo evitando la precipitación del carburo de cromo, y los de “bajo carbono” el cual pueden llegar hasta contenidos de 0.03%. En la figura 1.10 se presenta la variación del contenido de carbono, los rangos de temperaturas, y los tiempos necesarios para poder sensibilizar los aceros inoxidable.

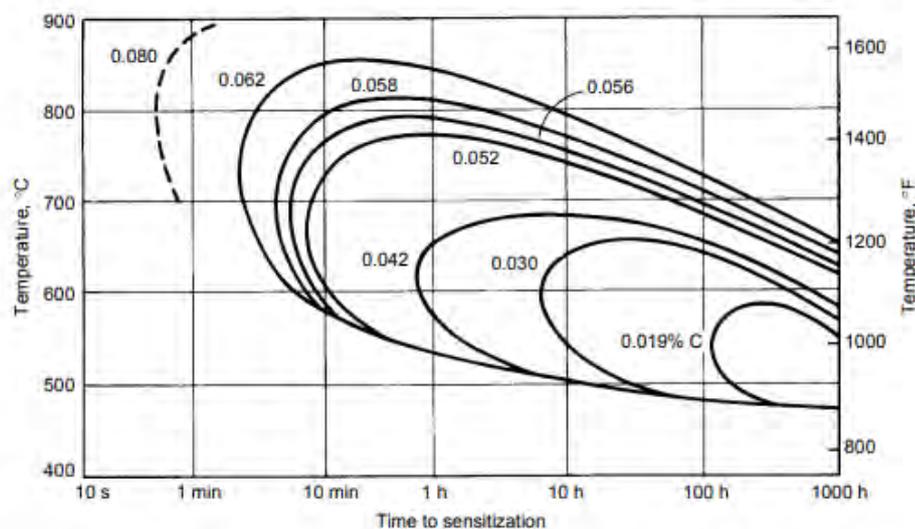


Figura 1.10 - Variación del contenido de cromo a través del límite de grano – Tomado “ASM Handbook Corrosion Vol 13” [9].

Adicionalmente se tiene un factor, que, si bien no es tan determinante como los mostrados anteriormente, resulta pertinente mencionarlo y es el tamaño de grano, dado que se ha determinado que, para granos más finos, hay una mayor formación de carburos en sus límites de granos, reduciendo, de mayor manera, su resistencia en comparación a aceros con granos de mayor tamaño tal efecto se presenta en la figura 1.11.

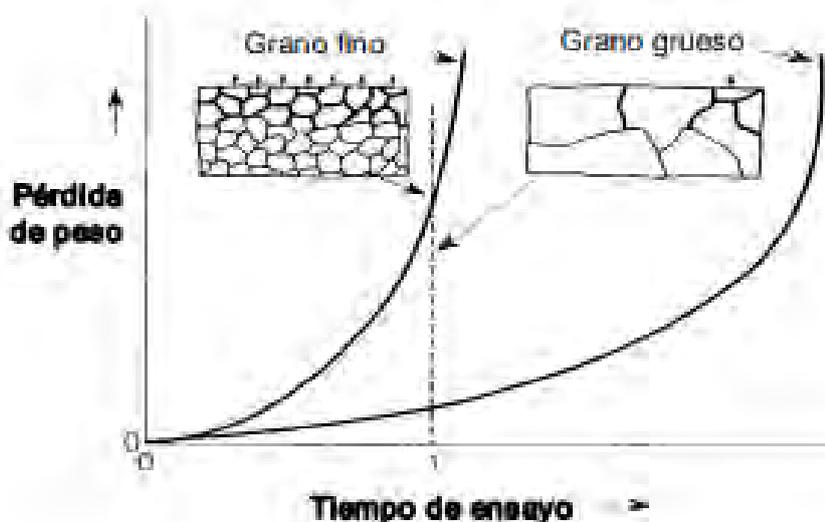


Figura 1.11 - Influencia del tamaño de grano sobre la resistencia a la corrosión intergranular – Tomado “Fundamentos del análisis de falla” por Dr. Carlos Fosca [7].

En la mayoría de las situaciones, las principales causas de sensibilización a la corrosión intergranular se pueden generar por tratamientos térmicos y/o procesos de soldaduras, ya que estos escenarios llevan al material o a una parte de él a las temperaturas críticas mencionadas anteriormente, aunque comúnmente se centran más en los primeros mencionados.

Las morfologías presentadas en la corrosión intergranular, sobre todo en procesos de soldadura, se pueden clasificar en las siguientes:

- “Knife – Line Attack” o Ataque en Línea de chuchillo que se da generalmente en aceros inoxidable austeníticos estabilizados, y tiene la particularidad que estos se dan en la zona contigua al cordón de soldadura, se presenta a continuación en la figura 1.12.

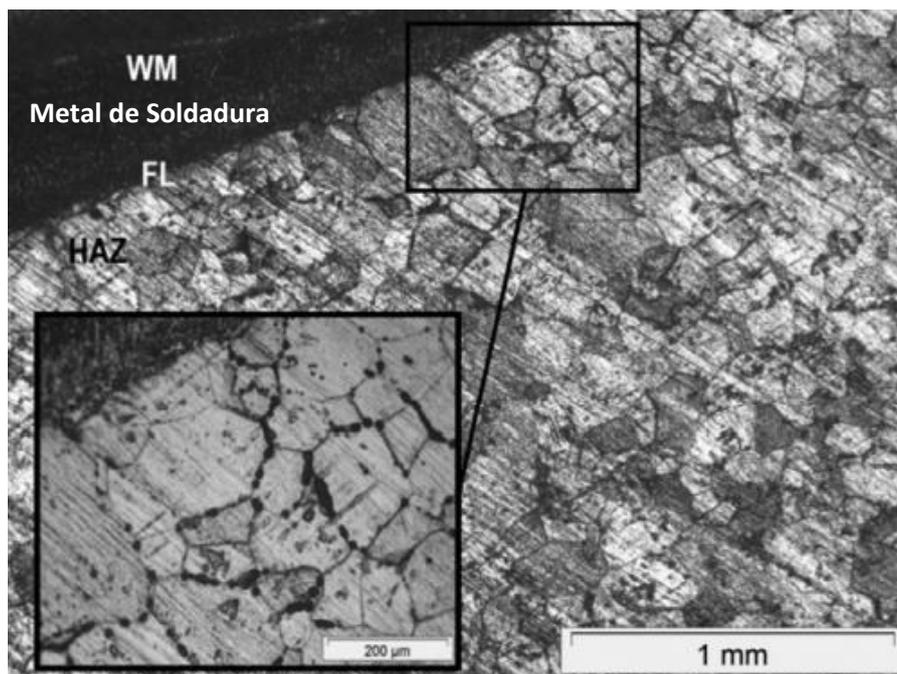


Figura 1.12 – Microestructura de un acero AISI SAE 347 sensibilizado – Tomado de “Influence of post welding heat treatments on sensitization of AISI 347 SS welded joints” [10].

- “Weld Decay Zone” o Zona de Decaimiento de soldadura, se da generalmente en aceros inoxidable austeníticos, y a diferencia del anterior mostrado esta se da en regiones alejadas de la zona afectada por el calor.

Si bien se han presentado las morfologías típicas en los fenómenos de sensibilización en aceros inoxidable, para el presente estudio nos centraremos en la morfología denominada “Weld decay zone” la cual corresponde al elemento de estudio.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente se presenta en la figura 1.13, un esquema de la zona de decaimiento de soldadura, en la cual se resalta que la zona sensibilizada, como se indicó previamente, se localiza a cierta distancia de la zona afectada por el calor.

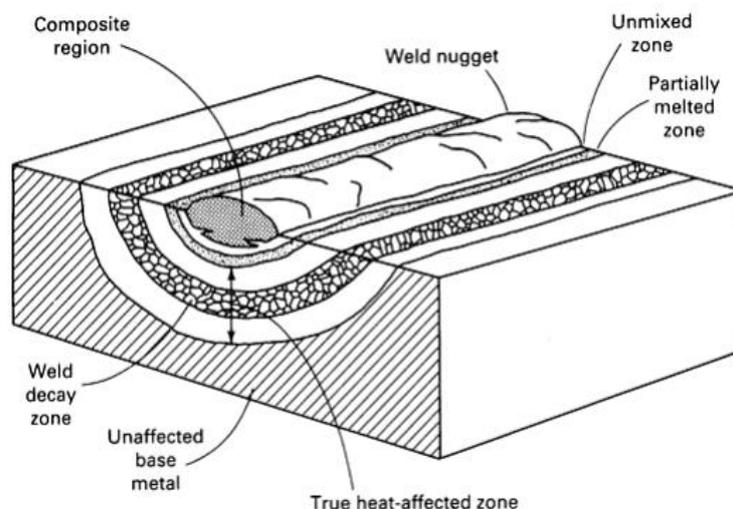


Figura 1.13 - Esquema de la morfología de la formación de carburos de “zona de decaimiento” – Tomado “ASM Handbook Corrosion Vol 13” [9].

Es importante tener en cuenta, que, si bien todo procedimiento de soldadura involucra ciclos térmicos dentro de la región de temperaturas críticas indicada anteriormente donde se pueden formar carburos, esto no necesariamente significa que se van a sensibilizar el material, entendiéndose con ello que perderán en los límites de grano la capa pasiva que protege a los aceros inoxidable contra los fenómenos de corrosión.

Debido a ello, para poder estudiar los fenómenos de sensibilización propios de los efectos de la soldadura y se recurre a diversos ensayos, uno de los cuales son las curvas de polarización

1.1.3 Curvas de polarización

La curva de polarización representa la cinética básica para cualquier tipo de reacción electroquímica. Estas curvas se realizan para una combinación específica de electrodo-electrolito, y se representan en un gráfico de densidad de corriente (i) vs potencial de electrodo (E). Por lo general, para una mejor interpretación de esta gráfica, estas muestran la densidad de corriente en una escala logarítmica ($\log |i|$ vs E).

Las curvas de polarización permiten cuantificar el comportamiento de un metal en distintas condiciones, las cuales pueden ser

- Estado pasivo, en el cual este presenta una película protectora constituida por óxidos los cuales cubren la superficie del material aislándola prácticamente del electrolito, reduciendo así los mecanismos de corrosión.
- Estado activo, en esta zona los potenciales del metal se disuelven de manera activa, generando así los fenómenos de corrosión, mientras más elevadas sea la corriente mayor será la velocidad de corrosión.
- Estado transpasivo, en esta zona presenta potenciales muy altos provocando que se modifique la naturaleza de su capa pasiva, convirtiéndola en inestable, ocasionando así fenómenos de corrosión.

Estas zonas se muestran a continuación en la figura 1.14.

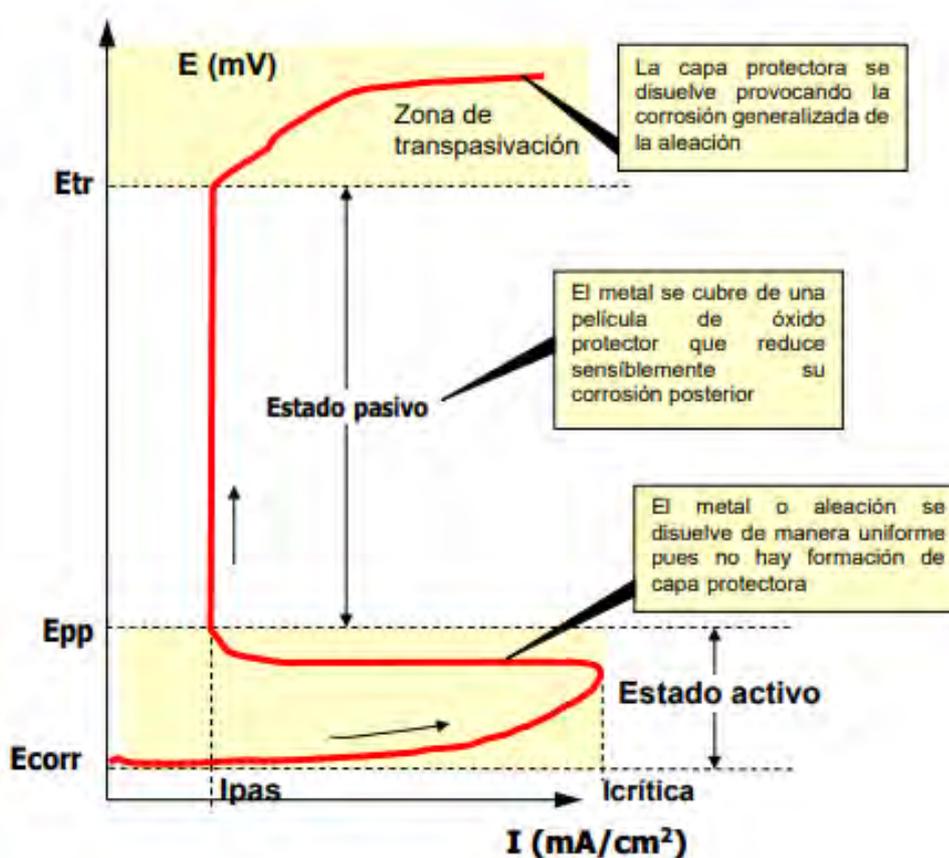


Figura 1.14 – Curvas de polarización y las zonas características – Tomado de “Fundamentos de la corrosión para ingenieros” por Dr. Carlos Fosca [11].

Una vez conocida estas zonas descritas previamente, se indican que el presente estudio realizará 2 ensayos electroquímicos, los cuales se proceden a indicar.

1.1.4 Técnicas Electroquímicas

Dado que el proceso de corrosión electroquímica ocurre con gran frecuencia en los distintos campos de la ingeniería, el cual está relacionado con un flujo de electrones, el cual nos permite evaluar las diferentes condiciones de la corrosión, como se ha indicado anteriormente, la medición de la densidad de corriente está íntimamente ligado con el estado de la capa pasiva del material, motivo por el cual resulta importante poder medir 2 variables fundamentales las cuales son : la corriente y el potencial electroquímico.

Para realizar el proceso experimental que siguen las técnicas electroquímicas, es importante contar con un potenciostato, que es un instrumento el cual permite realizar variaciones del potencial y así poder llevar a cabo la medición de la corriente. Este potenciostato va conectado a una celda electroquímica que contiene tres tipos de electrodos: el electrodo de trabajo (ET), el electrodo de referencia (ER) y el contraelectrodo (EA), como se muestra en el esquema de la figura 1.15.

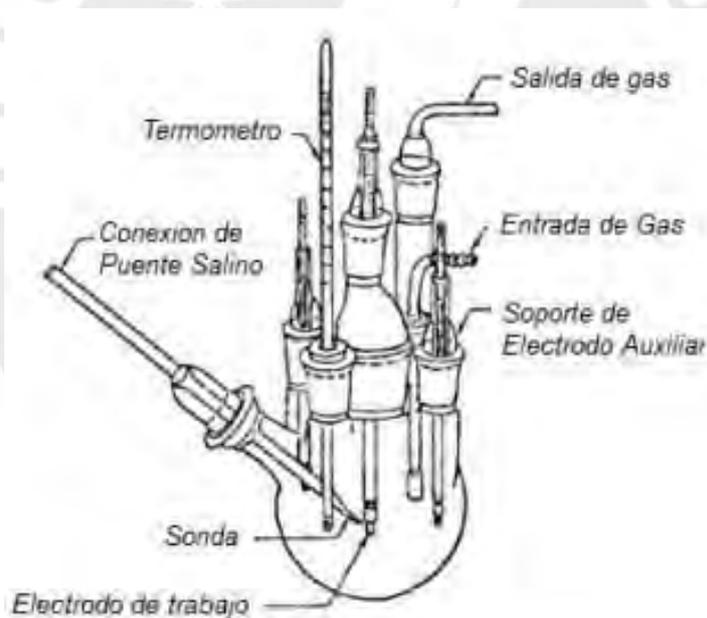


Figura 1.15 - Esquema de la celda Electroquímica – Tomado de la Norma ASTM G5 [12].

A continuación, se procede a describir las curvas de electroquímicas que se emplearán para el presente trabajo.

1.1.4.1 Ensayo de Polarización anódica

Como se mencionó anteriormente, en la corrosión electroquímica, se generarán 2 tipos de reacciones (una de oxidación y otra de reducción), estas alcanzan una

condición de equilibrio, donde el flujo de electrones (corriente) son iguales, tanto en el ánodo como cátodo, sin embargo, este ensayo, busca generar una polarización forzada empleando un potenciostato, el cual permitirá polarizar el metal en un sentido anódico, llevando el material a potenciales más positivos (polarización forzada) [5].

Cuando la polarización se realiza en sentido anódico, tal como se muestra en la figura 1.16, el potencial será desplazado a valores más positivos (más nobles) motivo por el cual se promueve la cinética de la semireacción de oxidación (reacción anódica), esto significa que la corriente aumentará en el sentido anódico ($i_{a1} > i_{corr}$).

Es importante mencionar que se debe definir, adicionalmente, un concepto relacionado a este ensayo y es el potencial de circuito abierto (OCP), el cual corresponde al potencial del circuito el cual posee el material solo estando sumergido sin aplicación de polarización forzada y en consecuencia se le considera como el valor inicial al momento del ensayo, permitiendo registrar este valor, el cual también se le conoce como E_{corr} .

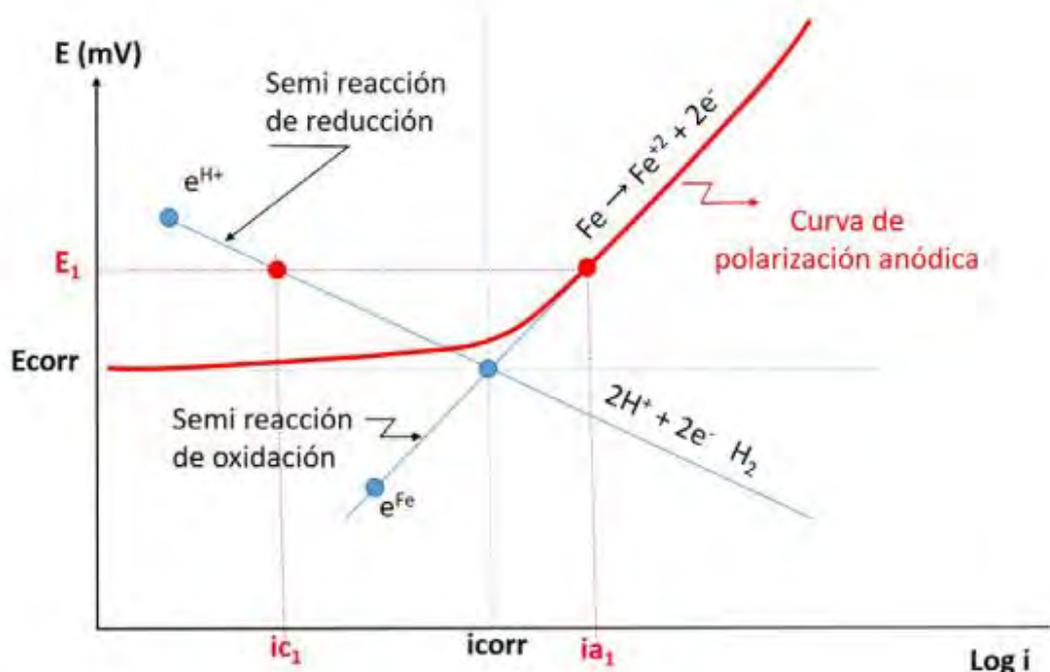


Figura 1.16 - Curva de polarización electroquímica en el sentido anódico – Tomado de “Fundamentos de la corrosión para ingenieros” por Dr. Carlos Fosca [11].

Cuando el metal es polarizado en sentido anódico y la corriente comienza a aumentar la velocidad de corrosión del metal en el medio se incrementará también, generando alguno de los fenómenos de corrosión descritos anteriormente, sin embargo, como se mostró en la figura 1.14, existen condiciones de potencial electroquímico donde la

capa pasiva del material se regenera, protegiendo al material y así reduciendo la velocidad de corrosión. Este fenómeno se conoce como pasivación y no se presenta en todos los materiales ni en todos los medios. Esta es la razón por la cual el ensayo de polarización anódica permite estudiar el comportamiento de las aleaciones pasivables como el acero inoxidable.

A continuación, se presente la figura 1.17, donde nos muestra la diferencia entre una aleación en estado activo (donde el material se corroe) y una aleación en estado pasivo (donde la capa protectora del material cumple su función).

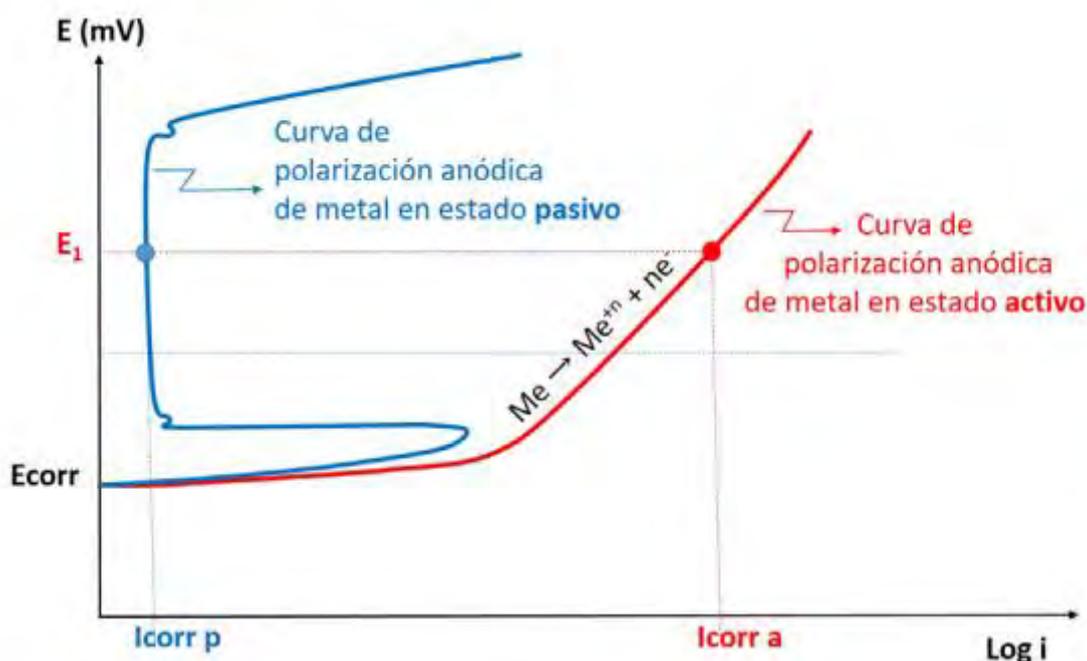


Figura 1.17 - Curva de polarización anódica para un metal en estado activo (curva roja) y un metal en estado pasivo (curva azul) – Tomado de “Fundamentos de la corrosión para ingenieros” por Dr. Carlos Fosca [11].

1.1.4.2 Ensayos de Reactivación Electroquímica Potenciocinética de Doble Lazo

Es una de las técnicas de polarización electroquímica más empleadas para estudiar el comportamiento de aceros inoxidables sensibilizados. Como se mencionó anteriormente, el tiempo a las temperaturas críticas determinará la cantidad de precipitación de carburo. Cuando los carburos de cromo precipitan en los límites de grano, el área inmediatamente adyacente se empobrece de cromo. Cuando la precipitación es relativamente continua, el agotamiento hace que el acero inoxidable sea susceptible a la corrosión intergranular, dado que se genera la disolución de la capa protectora.

Los fenómenos de sensibilización, antes descritos, producidos durante los procesos de soldadura son los más comunes de los casos de corrosión intergranular en los aceros inoxidable austeníticos. Si bien el método más empleado para este tipo de técnicas lo encontramos en la norma “*ASTM A262-15 (2021): Standard Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels*”, entre las principales limitaciones que tiene es que no permite cuantificar el grado de sensibilización, motivo por el cual en el presente estudio se empleará otra alternativa descrita en la norma “*ISO 12732 :Corrosion of metals and alloys — Electrochemical potentiokinetic reactivation measurement using the double loop method (based on Čihal's method)*” [13].

Este ensayo se basa en exponer a la muestra a una solución ácida en la cual el material se encuentra en un estado activo de corrosión, que para los aceros AISI SAE 304 y AISI SAE 304L es de aproximadamente -400 mV versus SCE [14]. Luego, la muestra será sometida a una polarización anódica hasta alcanzar un potencial de $+200$ mV versus SCE, entonces en esas condiciones la aleación pasará de una región activa a una región pasiva.

La capa pasiva que poseen los aceros inoxidable se encuentra en un estado metaestable en la región activa, cualquier defecto o heterogeneidad en esta capa puede causar su disolución. Estos defectos son las zonas empobrecidas en cromo en aceros sensibilizados (Sedricks 1996, Majidi et al 1986).

Una vez alcanzado el potencial indicado, se procede a invertir la dirección del barrido, y el potencial disminuirá hasta el mismo nivel de potencial de corrosión inicial registrado. A este proceso se le denomina reactivación, se pasa ahora de la región pasiva (donde tiene una capa protectora) a la activa, debido a este cambio de zonas, la densidad de corriente registrada puede aumentar como resultado del deterioro de estas capas protectoras, sobre todo en las regiones empobrecidas de cromo (sensibilizadas). En materiales no sensibilizados, la película pasiva permanece intacta debido a que el barrido de potenciales electroquímicos es lo suficiente rápido para evitar la despasivación del material. En consecuencia, el tamaño del bucle es muy pequeño en relación con el bucle del material sensibilizado (Majidi et al 1986).

A continuación, se muestra la figura 1.18, la cual muestra los bucles en las curvas trazadas con el potencial del electrodo de trabajo versus la corriente que fluye en el contraelectrodo y la muestra. Este electrodo puede estar hecho de platino. Para medir el grado de sensibilización se emplea el cociente de I_r/I_a , donde I_a es la corriente

máxima que alcanza el lazo más grande e I_r es la corriente máxima que alcanzó el lazo más pequeño.

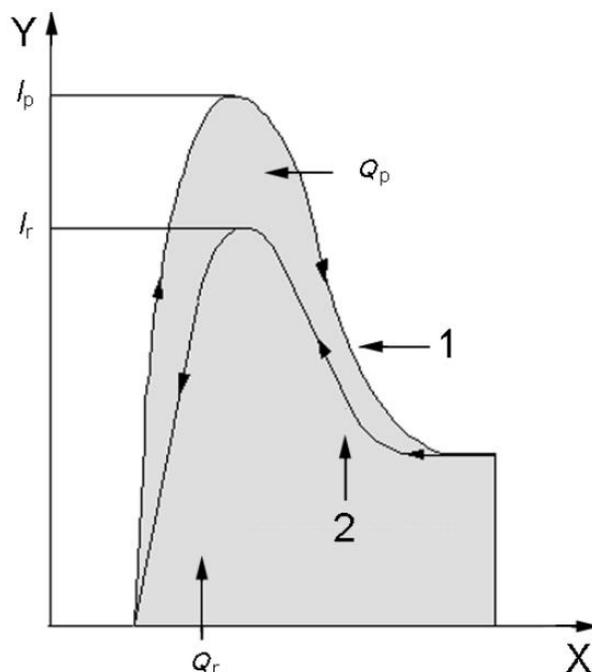


Figura 1.18 - Curvas de polarización esquemática del método de prueba EPR doble bucle – Tomado de ISO 12732 [13].

1.2 Ácido Carmínico

El ácido carmínico es un insumo para la fabricación de colorante rojo, de origen natural, este se puede obtener mediante el procesamiento del insecto femenino de la especie *Dactylopius Coccus Costa* [15], el cual es un insecto - parásito que se desarrolla en la penca de la tuna. Este ácido se emplea como colorante natural en las diferentes industrias [16][17] como:

- Industria Farmacéutica: Carmín en polvo o solución empleado en la preparación de grageas. En solución alcalina se emplea en pasta dentífrica y enjuagues bucales
- Industria Alimentaria: se emplea principalmente como colorante en productos como embutidos en general, bebidas, yogures, helados, mermeladas entre otros.
- Industria Cosmética: Se emplea en lápices labiales, polvos faciales, lápices para los ojos, etc.
- Industria Textil: Empleado para el teñido de prendas de vestir.

Como se mencionó anteriormente el ácido carmínico es extraído de la cochinilla (*Dactylopius coccus* Costa) el cual este es un insecto que vive como huésped de la tuna, la cual la podemos encontrar en Perú, Chile y México principalmente, y se muestra en la figura 1.19



Figura 1.19 - Hojas de tuna (*Opuntia picus cactil*) infestada de la cochinilla (*Dactylopius coccus costa*) usados para la crianza y producción de ácido carmínico – extraído de Catálogo de maquinaria para procesamiento de Cochinilla [18].

Es importante mencionar que en la actualidad son alrededor de 15 las empresas dedicadas a la exportación de este insumo a nivel nacional, las cuales destacamos a Pronex S.A, quien es el primer y más grande productor de colorante carmín para aplicaciones en la industria alimentaria [19], todo esto en el marco de resaltar la importancia que tiene este insumo en el contexto nacional y también para ubicarla dentro de un sector que está en un fuerte crecimiento y debe tener mayor reconocimiento dentro de la sociedad nacional. A continuación, se muestra la tabla 1.5 donde se indican el valor por la exportación de los diferentes colorantes naturales, entre ellos el ácido carmínico.

Tabla 1.5 – Valor de exportaciones de los diferentes colorantes en Perú (2018-2022) – Extraído de “Colorantes Naturales: Evolución del Mercado Mundial y Nacional” por Centro de Investigación de Economía y Negocios Globales [20].

Perú : Exportación de Colorantes Naturales (US\$ Miles)

Descripción Comercial	2018	2019	2020	2021	2022
Colorantes Naturales	140,407.20	118,809.70	118,199.41	124,535.70	162,675.30
Cochinilla y derivados	100,326.50	82,728.50	77,737.60	92,186.10	128,733.50
carmín de cochinilla	78,789.10	65,758.60	60,330.90	73,364.90	105,576
Ácido Carmínico	20,383.60	15,980.70	15,661.90	17,167.70	21,220.50
Cochinilla (entero)	1,153.80	989.10	1,380.90	1,653.30	1,936.90

Es importante resaltar que, si bien en la actualidad existe una tendencia a desplazar los colorantes naturales por los sintéticos, exclusivamente por temas de costo. Sin embargo, regulaciones y normas internacionales han posicionado a los colorantes de origen natural por encima de los sintéticos, esto se debe por sobre todo a los efectos sobre la salud sobre todo en la industria alimentaria [21]. Este hecho ha retomado el interés por este colorante, aún bastante empleado y demandado, siendo el país productor por excelencia el Perú, como se muestra en la tabla 1.6, el cual sufre hasta en un 80% de la demanda internacional de este producto, el cual corresponde a un 40% como tinte y un 60% como producto en forma de insecto.

Tabla 1.6 - Principales países exportadores de carmín de cochinilla (2017-2021) – Extraído de “Análisis de Mercado de la cochinilla” por Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego [19].

Exportadores	Años				
	2017	2018	2019	2020	2021
Perú	46,370	36,998	30,023	27,532	31,569
España	8,476	9,352	8,849	17,106	20,531
India	1,613	3,560	6,223	8,486	10,114
Brasil	1,392	1,135	643	674	740
México	1,356	2,569	2,847	---	---

Entre los principales productos derivados que se puede extraer de la cochinilla se tiene [19]:

- Cera.
- Ácido carmínico en cristales.
- Ácido carmínico en solución acuosa, estable a los ácidos de frutas.
- Ácido carmínico soluble en aceites y grasas comestibles.
- Carmín de cochinilla en diferentes concentraciones de ácido carmínico.
- Solución de la laca Carmín, al 4% de ácido carmínico.
- Solución acuosa de la laca Carmín, libre de sodio y potasio.
- Laca Carmín en polvo, hidrosoluble.
- Laca Carmín en polvo, hidrosoluble libre de sodio y potasio, etc.

Para el presente estudio se tratará de enfocar más en el producto obtenido como ácido carmínico como tal, entre las propiedades físicas y químicas se presentan:

- Polvo rojo oscuro brillante.
- Soluble en agua o alcohol.
- Soluble en soluciones alcalinas.
- Tiene mejor resistencia al calor y a la oxidación química, comparado con los colorantes sintéticos.
- Es un producto estable. No se han detectado variaciones en su contenido de ácido carmínico en productos almacenado durante 4 años. Su principal propiedad radica en su enorme poder colorante, que supera indiscutiblemente al de cualquier otro.
- No es tóxico. Es completamente inofensivo. Puede ser ingerido por el organismo humano o estar en contacto prolongado.
- El Ácido Carmínico es un polvo pardo rojizo oscuro o rojo brillante, soluble en agua, alcohol, bases y ácidos. Su coloración en soluciones acuosas varía con su valor de pH [22], tal como se muestra en la figura 1.20:
 - Naranja: A pH menor a 4.8
 - Rojo-naranja: Entre pH 4.8 a 6.2
 - Violeta: A pH mayor a 6.2



Figura 1.20 – Variación del color del ácido carmínico en función del pH – Tomado de “An Advanced Spectroscopy Lab That Integrates Art, Commerce, and Science as Students Determine the Electronic Structure of the Common Pigment Carminic Acid” [22].

Teniendo en consideración lo antes presentado, el presente estudio se centrará en analizar los efectos corrosivos que presenta esta sustancia en el acero inoxidable AISI/SAE 304 L, si bien no se ha encontrado información específica de estos efectos, se presentan en la figura 1.21 los efectos generados de algunos ácidos orgánicos representativos como el ácido acético y el ácido abietico.

Es importante considerar que el material de estudio corresponde a un AISI/SAE 304 L (18-10), que, según la clasificación dada por el mismo autor, corresponde a un "0" lo que significa que el material es adecuado para el transporte de ácidos orgánicos, como es el ácido carmínico.

ABIETIC ACID C ₁₉ H ₂₉ COOH		ACETIC ACID CH ₃ COOH										cont.
Conc. %	Temp. °C	Conc. %	1	1	5	5	5	5	10	10	10	20
	100	Temp. °C	90	100	20	50	75	100	20	75	100	20
	275		=BP	=BP			=BP	=BP			=BP	
Carbon steel		Carbon steel	1	2	1	2	2	2	1	2	2	2
13% Cr-steel		13% Cr-steel	0	1	1	2	2	2	1	2	2	1
18-2	0	18-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18-10	0	18-10	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
17-12-2.5	0	17-12-2.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18-13-3	0	18-13-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17-14-4	0	17-14-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
904L	0	904L	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sanicro 28	0	Sanicro 28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
254 SMO	0	254 SMO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
654 SMO	0	654 SMO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SAF 2304	0	SAF 2304	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2205	0	2205	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SAF 2507	0	SAF 2507	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ti	0	Ti	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 1.21 - Efecto de ácidos orgánicos en tuberías de diferentes materiales – Tomado de "Corrosion Handbook for Stainless Steels" por Avesta Sheffield [23].

1.3 Metodología del Análisis de Falla de un componente

El análisis de falla de un componente es un proceso de vital importancia para determinar las causas físicas por la que esta falla, esto se realiza mediante el análisis de la evidencia física, con el uso de diferentes herramientas las cuales nos permitirán, mediante los diferentes ensayos y análisis, entender el mecanismo de falla.

La ASM International [24] explica que la causa raíz de la falla de un componente puede ser:

- a) Origen físico (causa raíz física): Son las razones físicas que provocan la falla (mecanismo de falla).
- b) Origen humano (causa raíz humana): Son todos los errores humanos, si los hubiera, que provocaron la falla física.
- c) Origen sistema (causa raíz latente): Representan todas las deficiencias en los sistemas de gestión que permiten que los errores humanos ocurran y no sean detectados.

Existen diversas metodologías o procedimientos para detectar la causa de una falla [25]:

- Análisis de falla (FA): Tiene por finalidad encontrar las razones físicas (mecanismo de daño) que provocó la falla. Este análisis se realiza en un laboratorio.
- Investigación de la causa raíz (RCI): Tiene por finalidad detectar los errores humanos (si los hubiera) que provocaron la falla física. Incluye una investigación en campo y es más profundo que el análisis de falla, ya que no solo se enfoca a la falla física, sino que también pretende encontrar las fallas humanas.
- Análisis de la causa raíz de la falla (RCA): Tiene por finalidad encontrar las deficiencias en los sistemas de gestión que permiten que los errores humanos continúen sin detectarse. Implica conducir un verdadero análisis que identifique las causas raíz físicas, humanas y latentes asociadas a como ocurrió un acontecimiento indeseable. La falla incluye ahora otros acontecimientos no mecánicos, como los incidentes de seguridad, defectos de calidad, quejas del cliente, problemas vinculados a procesos administrativos, entre otros.

1.3.1 Etapas de Análisis de Falla

Entre las etapas que se deben realizar en un procedimiento de análisis de falla, se resalta las que se consideran de mayor importancia para el presente estudio, y se indican a continuación [26]:

- Recolectar Datos importantes

Esta parte del proceso consta en conocer cuáles son las condiciones de operación normal a la que trabajó el componente de estudio, condiciones como tiempo de servicio, temperatura, amperaje, medios corrosivos, nivel de vibración entre otros, resultará parte fundamental para el desarrollo del análisis de falla.

- Examine y analice la falla primaria

Analizar la superficie de fractura del componente con la finalidad de identificar posibles mecanismos de falla, tipo de esfuerzos o signos sospechosos, se podrá hacer uso de diferentes herramientas como lentes de bajo aumentos o estereoscopio. Además, será necesario realizar previamente, incluso antes de realizar cualquier tipo de limpieza, registro visual del componente.

- Caracterice la pieza fallada y el material.

Se realizarán los ensayos respectivos, estos pueden ser END (pueden ser técnicas superficiales o volumétricas), análisis químico, análisis metalográfico, ensayos mecánicos y, dependiendo del caso específico, los ensayos necesarios para determinar el origen de la falla, una vez realizados estos se procederán a evaluar si los resultados obtenidos están dentro de las condiciones de diseños previamente recopiladas.

- Determine el mecanismo de falla y las fuerzas que lo causaron

Se deberá examinar todos los pasos, previamente descritos, y será en este paso donde se plantean las diferentes hipótesis para responder la duda inicial, asimismo complementando con los análisis y ensayos realizados, serán estos los que ayuden a fortalecer o ir descartando estas.

- Determine la causa raíz de la falla

Una vez analizado todos los resultados junto con las hipótesis planteadas, se estará en la capacidad de responder: ¿Cuál fue la causa primaria de la falla? y ¿Por qué falló el componente de esta manera y en esas circunstancias?

1.3.2 Alcance de los Ensayos realizados.

1.3.2.1 Inspección visual

La inspección visual es una técnica de ensayo no destructivo (END) cuyo alcance es detectar discontinuidades superficiales, sin embargo, para el caso del presente estudio, permitirá principalmente identificar, con ayuda de algunos instrumentos de medición e iluminación,

1.3.2.2 Caracterización de Material.

Entre los principales ensayos que se deben realizar al componente son los que nos permitan caracterizar el material, el objetivo de estos es conocer la composición química y la microestructura que este posee, todo esto con la finalidad de conocer si el material fue el adecuado para las condiciones de operación a la que estuvo sometido. Para esto se requiere realizar los siguientes ensayos:

- Análisis Químico

El análisis químico es una técnica la cual tiene como objetivo determinar el porcentaje en peso de la composición química del componente en estudio.

- Análisis Metalográfico

El análisis metalográfico nos permite determinar la microestructura del componente de estudio, esto lo podremos relacionar con el estado de suministro, además, para el caso específico de estudio permitirá observar la formación de carburos, en caso hubiese.

Adicionalmente de los ensayos ya mencionados anteriormente, se realizarán ensayos específicos para poder evaluar la resistencia a la corrosión en determinados medios (ensayo de polarización anódica) y además estimar el grado de sensibilización, explicado anteriormente, de componentes similares sometidos a ciclos térmicos inadecuados (ensayo de reactivación electroquímica potenciocinética).

1.3.2.3 Ensayo de Polarización Anódica

Este ensayo nos permitirá evaluar la resistencia contra la corrosión (por resquicio o por picaduras) que presente el material del componente de estudio en determinado medio y en determinadas condiciones, y con esto se verificará si el material ha sido seleccionado de manera adecuada.

1.3.2.4 Ensayo de Reactivación Electroquímica Potenciocinética

Este ensayo nos permitirá evaluar el grado de sensibilización que se genera por un procedimiento de soldadura inadecuado, es importante mencionar que este no se realizará al componente de estudio, sino a unas probetas que serán sometidas a un procedimiento de soldadura ya establecido, con la finalidad de estimar el efecto del ciclo térmico y caracterizar el grado de sensibilización [27].



2. Análisis de Falla del Componente

Para realizar el presente estudio se ejecutaron diferentes análisis y ensayos siguiendo los lineamientos generales establecidos en la ASM Metal Handbook, Failure Analysis and Prevention [24].

Los ensayos del presente trabajo fueron realizados en el laboratorio de Materiales de la Sección de Ingeniería Mecánica de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

2.1 Inspección Visual

La inspección visual se desarrolló de acuerdo con establecido en el código “ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Sec. V, Artículo 9 – Visual Examination” [28], se tomó registro del nivel de iluminación esté por encima de 1000 luxes, mediante un medidor de luz visible, asimismo se empleó un estereoscopio de la marca Leica modelo S6D.

2.2 Análisis Químico

El equipo empleado corresponde a un espectrómetro de emisión óptica por chispa de la marca Bruker Modelo Q8 MAGELLAN, adicionalmente se siguió lo establecido en la norma “ASTM E415 - 21: Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry” [29].

Es importante mencionar que, si bien la norma da varias indicaciones, se resaltan las siguientes:

- La muestra debe tener 2 caras planas y paralelas.
- Se pide que la muestra tenga un acabado correspondiente de papel lija de grano entre 50 a 80, como recomendación, la muestra puede estar pulida con un acabado de papel lija de grano 120.
- Se recomienda que la pieza tenga un espesor de entre 10 mm a 38 mm.

Referente a la última indicación de la norma, se debe resaltar que para la pieza analizada no se puede seguir dado que el espesor nominal de la pieza corresponde a 1.47 mm.

2.3 Análisis Metalográfico

Para el análisis metalográfico se realizó siguiendo los lineamientos establecidos en las siguientes normas:

- *ASTM E3 -11: Standard Guide for Preparation of Metallographic* [30].
- *ASTM E407-07: Standard Practice for Microetching Metals and Alloys* [31].

Para realizar el análisis se empleó un microscopio óptico marca Leica DMI 5000 con una capacidad de hasta 1000 aumentos, adicionalmente posee una cámara y un software la cual permite capturar y procesar las imágenes registradas.

De manera general se procede a indicar el procedimiento seguido:

- Se extrajo una muestra del componente, empleando una sierra metalográfica.
- Se inicia un proceso de desbaste y pulido, empleando lijas de carburo de silicio de granulometría de 240, 320, 400 y 600 y para el pulido se empleó discos automáticos de paños de 9 μm , 3 μm y 0.04 μm .
- Finalmente se realizó un ataque electrolítico con una solución de ácido oxálico al 10% y con un voltaje de 6 V y 14 segundos [32].

Adicionalmente hay que indicar que para el análisis de las microestructuras observadas se consultó el “*ASM HANDBOOK Vol.9: Metallography and Microstructures*” [33].

2.4 Simulación Térmica

Se realizó una simulación de la distribución de la temperatura en el tiempo, con la finalidad de conocer el comportamiento físico del codo frente al proceso de soldadura (GTAW) que se empleó para unirlo a la línea de ducto de producción, para el presente estudio se ha elegido dos situaciones, la primera corresponde a un proceso de soldadura realizado adecuadamente, con un solo pase, y en el segundo corresponde a un ciclo térmico combinado, en el cual se trata de simular hasta 2 pases.

A continuación, se presentan en las tablas 2.1 y 2.2, los parámetros de soldadura en cada caso indicado previamente.

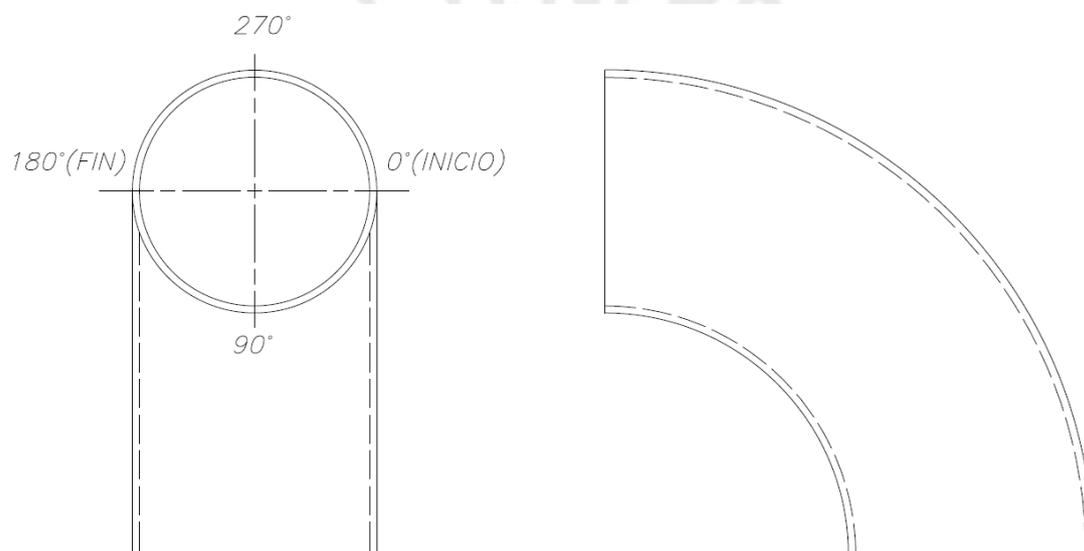
Tabla 2.1 - Parámetros de soldadura empleados para la probeta de un pase.

Voltaje (V)	Corriente (A)	Tiempo (s)	Aporte de Calor (J/mm)
12	48	130	470.9

Tabla 2.2 - Parámetros de soldadura empleados para 2 pases.

Pases	Voltaje (V)	Corriente (A)	Tiempo (s)	Aporte de Calor (J/mm)
Primer Pase	12	39	65	191.3
Segundo Pase	12	48	110	398.5

Para las condiciones planteadas para el “cupón” sometido a un ciclo térmico excesivo, se ha tratado de emular condiciones reales de operación, en donde, por una mala práctica el técnico soldador elige estos parámetros para acabar antes su tarea (primer pase), después de una breve inspección (2 minutos) y al darse cuenta de que no ha habido fusión completa comienza a soldar nuevamente, esta vez con los parámetros adecuados sometiendo al componente a un ciclo térmico adicional (pase 2).

**Figura 2.1 - Esquema de probeta a soldar.**

En la figura 2.1 se presenta un esquema del componente a soldar, es importante tener en consideración ciertos puntos.

- Para el presente estudio se ha planteado que el final del cordón coincida en el lado donde se ubica la costura del accesorio (codo), es decir en la posición de 180° (figura 2.1).
- Se realizó la unión soldada considerando una tubería de AISI SAE 316 L, dado que fue parte de la información suministrada. La secuencia de operación se hizo con gas de protección, y sin aporte de material.
- La secuencia tomada ha sido iniciar en 0° llegar a 90° y terminar en 180° (sentido horario), una vez finalizado, se reinicia en 0° llegar a 270° y terminar en 180° (sentido anti-horario), toda esta operación se considera como una sola

pasada, los datos de tiempos indicados en las tablas 2.1 y 2.2 refieren al tiempo total de la operación (sin considerar los 2 minutos de inspección indicados anteriormente en el cupón sometido a dos pasadas).

- Para el presente estudio se ha definido como 90° la parte de la curvatura interna o menor del accesorio (codo) y por el contrario se ha definido como 270° la parte de la curvatura externa o mayor, tal como se muestra en la figura anterior.
- Como bien se ha mencionado antes, el proceso de soldeo efectuado corresponde a GTAW, esto dado al gran uso que tiene en estas aplicaciones, pero también resulta importante considerar que el variar el proceso de soldeo afectaría la formación de carburos y por ende el efecto en su sensibilización [34].

Para la simulación numérica el software empleado fue ANSYS Transient Thermal, Extension Moving Heat, el cual se ha simulado en los puntos a distancias de 3, 4, 5 y 6 mm de la línea de fusión en la parte del accesorio (codo) y en cada posición indicada previamente (0° , 90° , 180° y 270°), indicar que se ha asumido que el calor se divide de manera equitativa tanto al accesorio como a la tubería, se presenta en la figura 2.2 esquema de la simulación realizada.

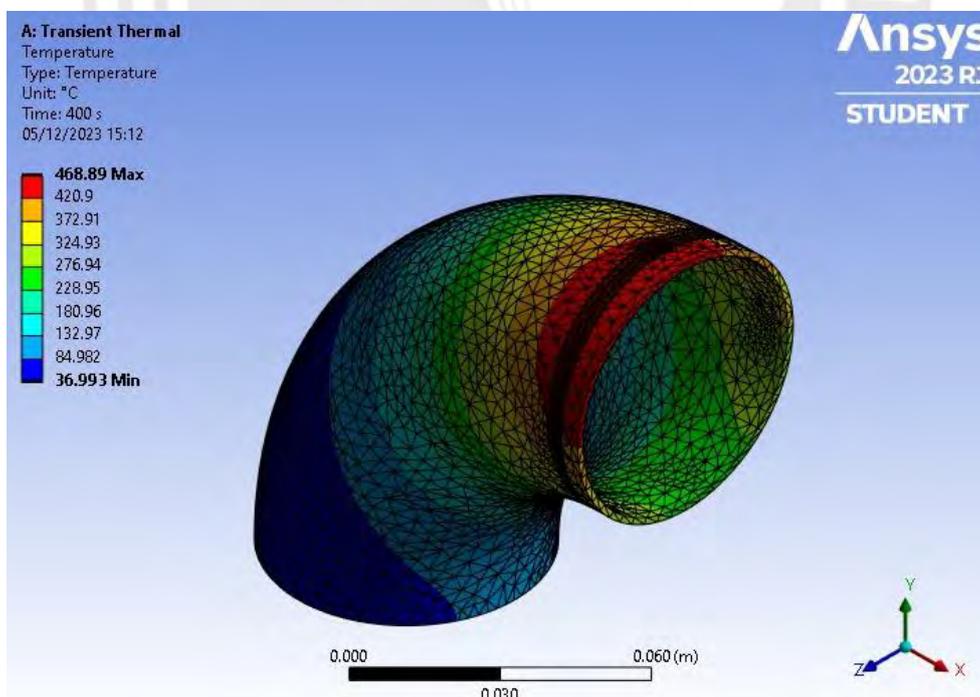


Figura 2.2 - Esquema de la ubicación de las probetas a ensayar.

2.5 Curvas de Polarización

2.5.1 Curva de Reactivación Electroquímica de Doble Lazo

Como ya se ha indicado en el presente trabajo, resulta de gran importancia poder estimar el grado de sensibilización que posee el elemento de estudio, para el procedimiento desarrollado se siguió lo establecido en la norma "ISO 12732 -2006: Corrosion of metals and alloys – Electrochemical potentiokinetic reactivation measurement using the double loop method (base on Cihal's method)" [13] (EPR - DL), se muestra un esquema en la figura 2.3, se indican los equipos e insumos empleados:

- Potencioestato: Marca Palmsens
- Celda de ensayo electroquímica
- Electrodo de Referencia: Electrodo de referencia de cloruro de plata Ag/AgCl
- Contraelectrodo: Electrodo de Platino
- Solución de trabajo: Solución de ácido sulfúrico (0.5M H₂SO₄) y tiocianato de potasio (0.01M KSCN).
- Electrodo de trabajo: Muestra preparadas según norma (Material AISI SAE 304L sometidas a 2 ciclos).

Además, se indican entre las principales condiciones referentes a la muestra a ensayar:

- Acabado superficial de la muestra: 0.04 micras.
- Polarizar las muestras a potenciales de -280 mV (antes de iniciar los ensayos).
- Rango de polarización: -300 mV a 200 mV SCE.
- Tasa de escaneo: 6 V/h



Figura 2.3 - Esquema de las curvas de polarización electroquímica potenciocinética

Las muestras fueron encapsuladas en una resina termofusible, y solo se expuso al ensayo un área equivalente de 30 mm² (1.5mm x 20 mm) adicionalmente se tomó para cada caso hasta 3 tomas y se promedió este valor de manera representativa.

Para el desarrollo del ensayo EPR – DL se siguió lo establecido en la norma previamente indicada, finalmente se procedió a medir tanto la corriente máxima (I_p) como la corriente de reactivación (I_r), obteniendo así el valor del grado de sensibilización para cada caso.

Se muestra a continuación en la tabla 2.3 los criterios de aceptación, según norma, que se emplean para indicar si el material esta sensibilizado (mayor a 5%), ligeramente sensibilizado (entre 1% a 5%) o no se encuentra sensibilizado (valores menores a 1%).

Tabla 2.3 - Criterio de aceptación según norma ISO 12732 – 2006 [8].

I_r / I_p	Interpretación General del grado de sensibilización
< 0,010	No sensibilizado
0,01 a 0,05	Ligeramente Sensibilizado (puede pasar el ensayo Streicher, Strauss o Huey)
> 0,05	Sensibilizada (no pasa el ensayo Streicher, Strauss o Huey)

Para el caso específico de estudio, se procedió a realizar una simulación física preparando un cupón de soldadura para después analizar las 4 ubicaciones del codo (0°, 90°, 180°, 270°). El cupón de soldadura fue sometida a 2 pases en cada lado, induciendo de esta manera un ciclo térmico severo y a 4 distancias diferentes (3, 4, 5 y 6 mm) medidas desde un extremo del cordón de soldadura. Se prepararon cuatro cupones para analizar en cada uno de ellos el grado de sensibilización y de resistencia a la corrosión de una de las cuatro distancias elegidas (1 cupón para cada distancia), a continuación, se muestra en la figura 2.4 un esquema general de la ubicación de las zonas a inspeccionar.

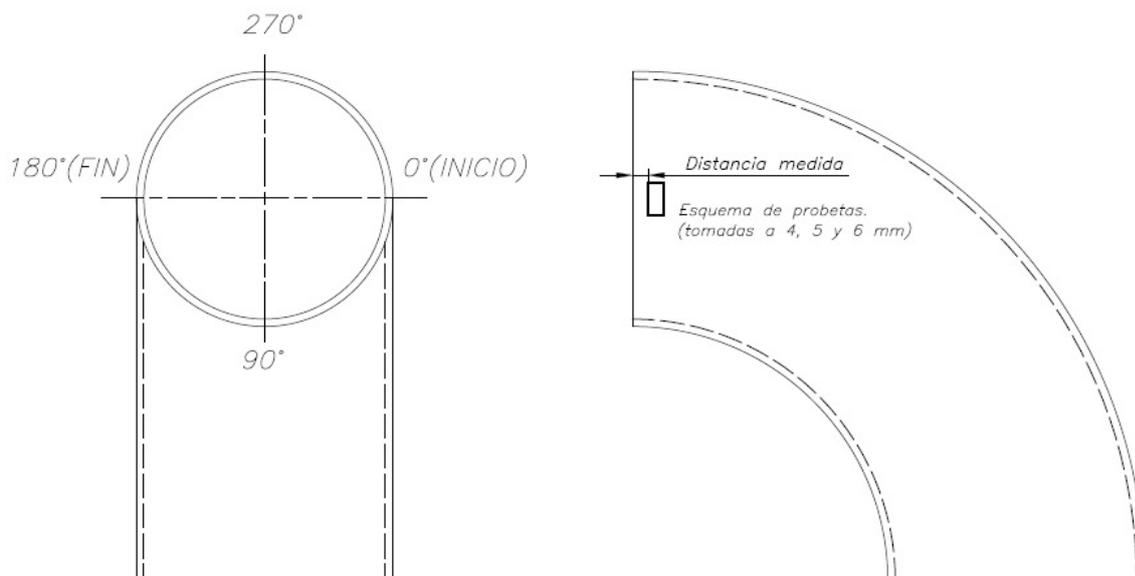


Figura 2.4 - Esquema de la ubicación de las probetas a ensayar

Es importante mencionar que, si bien en la simulación térmica se menciona que se realizaron 2 probetas con parámetros de soldadura distintos, en una posterior inspección metalográfica del cupón soldado correctamente (solo un pase) no se observó formación de carburos, motivo por el cual solo se concentró el estudio en las uniones soldadas hasta con 2 pases.

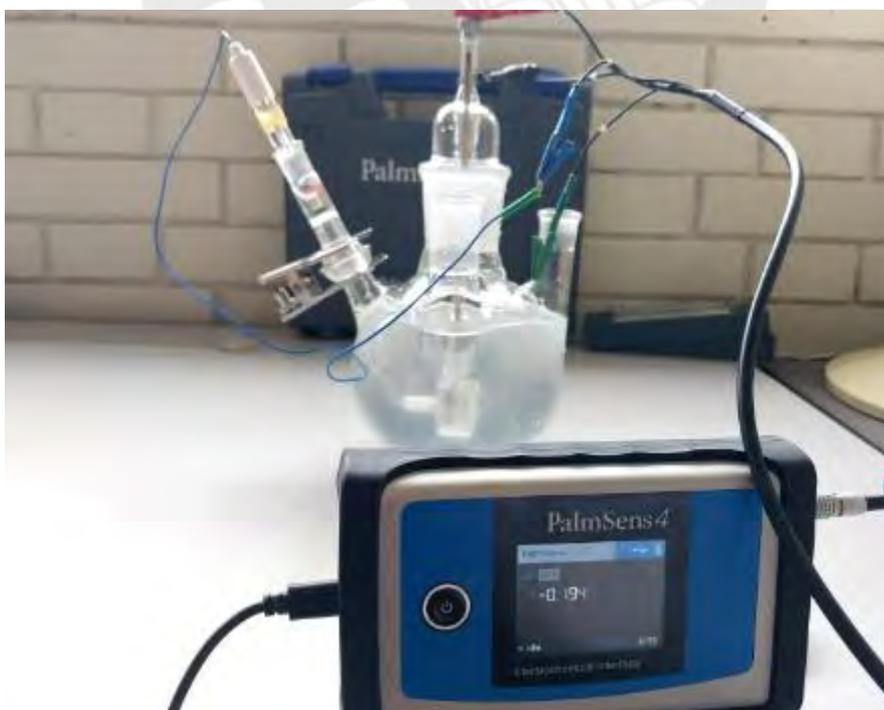


Figura 2.5 – Celda Electroquímica y Potencioestato

2.5.2 Curvas de polarización anódica en ácido carmínico

Para la realización de este ensayo se siguió lo establecido en la norma ASTM G5-14 “*Standard Reference Test Method for Making Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements*” [12], la cual nos da algunas indicaciones para el procedimiento que se debe seguir para estudiar el comportamiento de algunos materiales frente a la polarización anódica, para este ensayo considerar los siguientes equipos y accesorios:

- Potenciostato: Marca Palmsens (Palmsens 4)
- Celda de ensayo electroquímica (1000 ml)
- Electrodo de Referencia: Electrodo de referencia de cloruro de plata (AgCl)
- Contraelectrodo: Electrodo de Platino
- Electrodo de trabajo: Muestras preparadas según norma: 2 AISI SAE 304L (sometidas a un ciclo y otra sometida a 2 ciclos) y 316L (sometidas a un ciclo)
- Tasa de barrido: 6 V/h

Adicionalmente, Las muestras fueron encapsuladas en una resina termofusible, y solo se expuso al ensayo un área equivalente de 15 mm^2 (1.5mm x 10 mm), las muestras fueron pasivadas previamente, para evitar mecanismos de corrosión por resquicios durante el ensayo, si bien la norma indica un procedimiento a seguir, para el desarrollo del presente estudio se trató de simular las condiciones de operación indicadas por el solicitante. Las condiciones fueron las siguientes:

- Solución: Ácido Carmínico 2.5%
- Temperatura de trabajo: 60 °C
- pH de la solución: 2.71
- Conductividad: 0.805 mS/ cm
- Fluido en movimiento: 250 RPM

Respecto al procedimiento del ensayo, la muestra tuvo un tiempo de permanencia de 8 horas (en las condiciones previamente indicadas) antes de iniciar el ensayo de polarización anódica, una vez iniciado el ensayo se procedió a registrar los datos de corriente y potencial.

Las muestras ensayadas, fueron extraídas de la ubicación de 180° (la cual corresponde a la costura de fabricación del accesorio) a una distancia de 5 mm de la unión codo – tubería, se tomaron 3 muestra diferentes las cuales 2 corresponden a probetas de AISI SAE 304 L (una “sensibilizada” con dos pases de soldadura y otra “sin sensibilizar” con un pase de soldadura), y también a una probeta de AISI SAE 316 L soldada adecuadamente (con un pase de soldadura).

El objetivo de este ensayo es comprender el comportamiento del material en la solución de ácido carmínico y en las condiciones lo más próximas a las que provocaron la falla en servicio (que fueron determinadas a través de la simulación del ciclo térmico) del codo de acero inoxidable con la finalidad de evaluar la idoneidad de este material para el transporte indicada previamente



3. Resultados y Análisis

3.1 Inspección visual

Inicialmente se identificó el componente, el cual corresponde a un codo de 90° de $\varnothing 2''$, con un espesor de 1.5 mm, de grado sanitario, se muestra en la figura 3.1 el componente a estudiar.

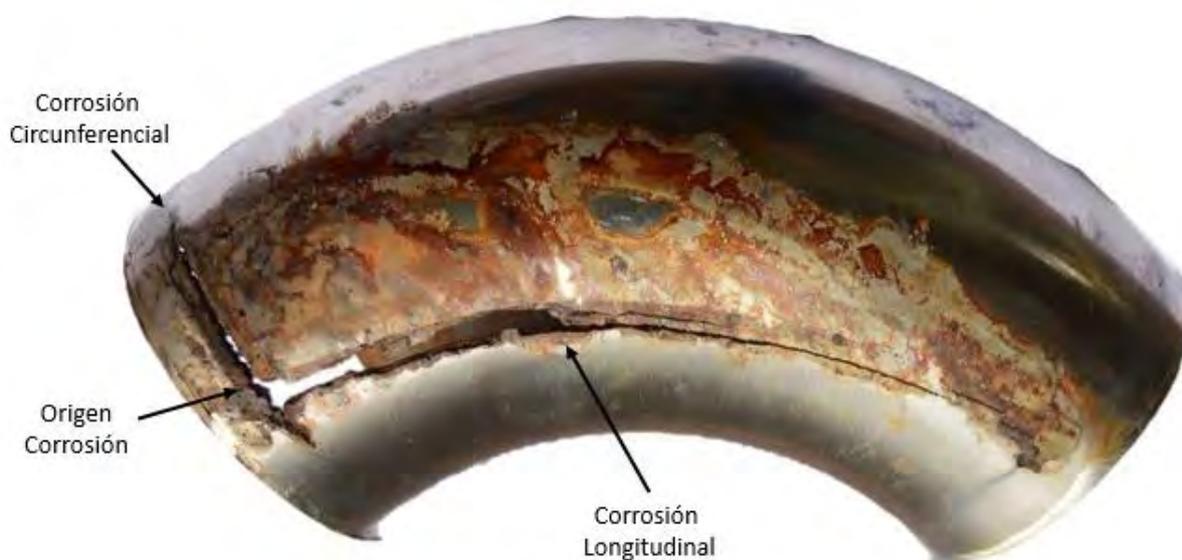


Figura 3. 1 - Componente de Estudio.

De acuerdo con lo observado en la figura 3.1 se aprecian fisuras productos de la corrosión, las que, para el presente estudio se ha planteado clasificarlas en 2 tipos originadas por corrosión, las cuales corresponden:

- Corrosión longitudinal.
- Corrosión circunferencial.

Se ha denominado corrosión longitudinal a la que se ha propagado a lo largo del eje de la tubería, más precisamente en la costura de fabricación del codo (ubicación 180° figura 2.1), la cual se puede observar ha sufrido corrosión y ha fisurado casi en su totalidad, y se ha denominado como corrosión circunferencial aquella que se propagó de manera perpendicular a la costura de fabricación, pero paralela y a 5.71 mm de la línea de fusión del cordón de soldadura que une el codo con uno de los extremos de la tubería. Es decir, a diferencia de la corrosión longitudinal donde se fisura en el mismo cordón de soldadura, para la corrosión circunferencial, el agrietamiento se produce a una distancia de éste, pero siguiendo una trayectoria paralela a la junta.

En la figura 3.2 se presenta el lado reverso del codo, se puede observar que, además de mostrar muy pocos signos de corrosión (la cual estuvo localizada principalmente a lo largo de la costura del codo), hay una impresión “SMS 316L” lo que puede significar que fue fabricado con un material de acuerdo al estándar AISI SAE 316L y que se trataría de un codo sin costura, o que también puede hacer referencia la norma Swedish Metric Standard, elaboradas por el Instituto Suecia de Normalización, las cuales se emplean en la industria alimentaria y aplicaciones higiénicas, es importante mencionar que, según la información brindada para el presente estudio, era sin costura, pero que a la luz de los resultados de la inspección visual se trata de un codo fabricado por soldadura.



Figura 3.2 - Vista de la Zona del cordón de la Soldadura

En la figura 3.2 también se aprecia que la corrosión en este lado del codo estuvo concentrada en la unión soldada circunferencial. Adicionalmente también se registró corrosión en el lado mostrado anteriormente, se muestra con mayor detalle en la figura 3.3.

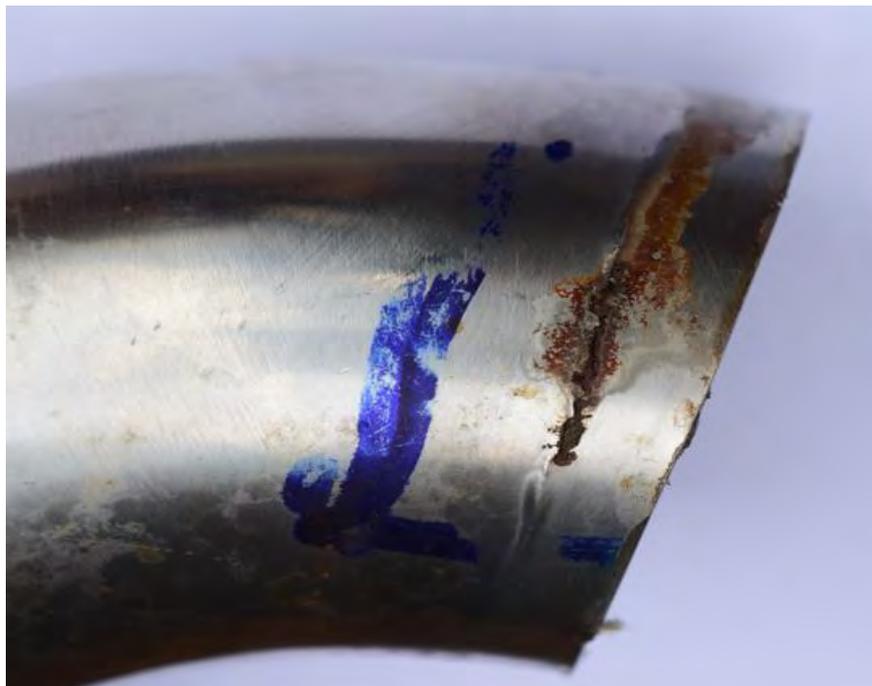


Figura 3.3 - Vista de mayor detalle de corrosión.

Por otro lado, en la figura 3.4 se observa la parte final de la fisura longitudinal, se puede observar la presencia de una fisura que se extiende a lo largo del todo el cordón longitudinal.



Figura 3. 4 - Vista de Estereoscopio de la fisura que atraviesa longitudinalmente el codo en estudio.

3.2 Análisis Químico

El resultado del análisis químico realizado al componente de estudio se muestra a continuación en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 - Análisis Químico del codo*

Tipo de acero	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo
SS316L	0.035	2	0.045	0.03	1	10-14	16-18	2-3
SS304L	0.035	2	0.045	0.03	1	8-12	18-20	-
CODO OD	0.03	0.82	0.028	0.006	0.4	8.17	18.21	0.03

*Todos los valores indicados se expresan en porcentaje, en caso de no indicar un rango, se refiere al máximo valor permisible.

De acuerdo con los resultados se observa que la composición química del codo no es compatible con un SS316L, sino con un SS304L, los valores de composición fueron extraídos según la norma “*ASTM A270: Standard Specification for Seamless and Welded Austenitic and Ferritic/Austenitic Stainless Steel Sanitary Tubing*” [35]. En consecuencia, la grabación en el codo de la denominación del acero inoxidable con el que fue fabricado, no se corresponde con los resultados del análisis químico y contradiciendo lo hallado en la inspección visual. pues, no se trata de un acero inoxidable austenítico AISI/SAE 316L ni tampoco es un codo fabricado sin costura. Este primer hallazgo es tremendamente importante para entender la falla prematura del codo en servicio. Tanto el material del componente como su fabricación no corresponden con las especificaciones técnicas establecidas en las condiciones de diseño. Peor aún, el grabado de las especificaciones en el codo no son las correctas y se podría estar configurando una selección inadecuada del material. Sin embargo, es importante comprender a cabalidad si efectivamente estos factores (aleación y fabricación del codo) han sido realmente la causa raíz de la falla catastrófica del codo en servicio.

3.3 Análisis Metalográfico

Una vez identificadas las zonas de interés, producto de la inspección visual, se procedió a realizar un análisis metalográfico en estas, las cuales fueron identificadas como corrosión longitudinal y corrosión circunferencial. Adicionalmente, también se analizó una zona del componente alejado de la corrosión, como se muestra en la figura 3.5, para poder verificar las condiciones de suministro. El ataque metalográfico de las diferentes muestras se realizó con el ataque electrolítico mencionado anteriormente.

La figura 3.5 muestra la microestructura del material base constituida por granos equiaxiales de austenita, tomado de una sección transversal.

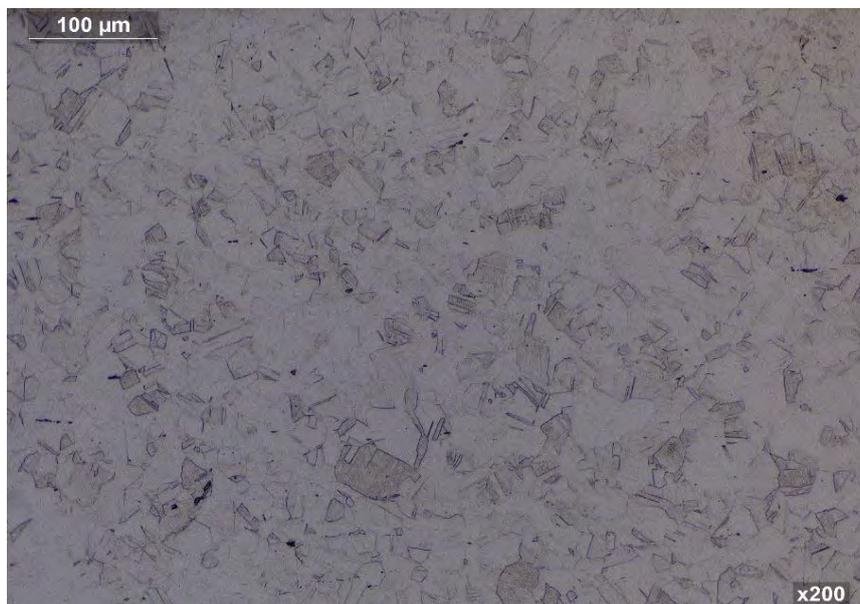


Figura 3. 5 - Metalografía el metal base con ataque – 200X – Reactivo: ácido oxálico

- Cordón longitudinal

La figura 3.6 muestra la zona que se analizará metalográficamente y las flechas verdes indican el corte y la sección analizada.

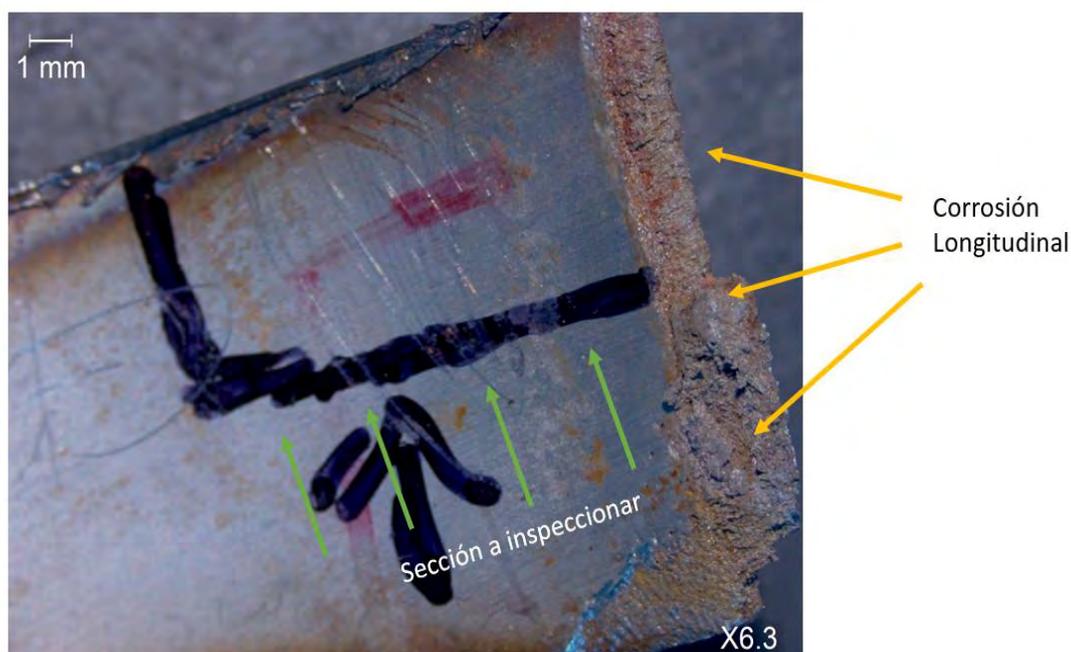


Figura 3.6 - Sección a extraer del cordón longitudinal

En la figura 3.7 se observa la sección mostrada después del corte metalográfico, donde se aprecia el perfil de la sección transversal del codo. Es importante mencionar que se observa un desgaste mayor en la parte interna del componente y especialmente en la unión soldada, por lo que se infiere que la corrosión comenzó desde la parte interior.

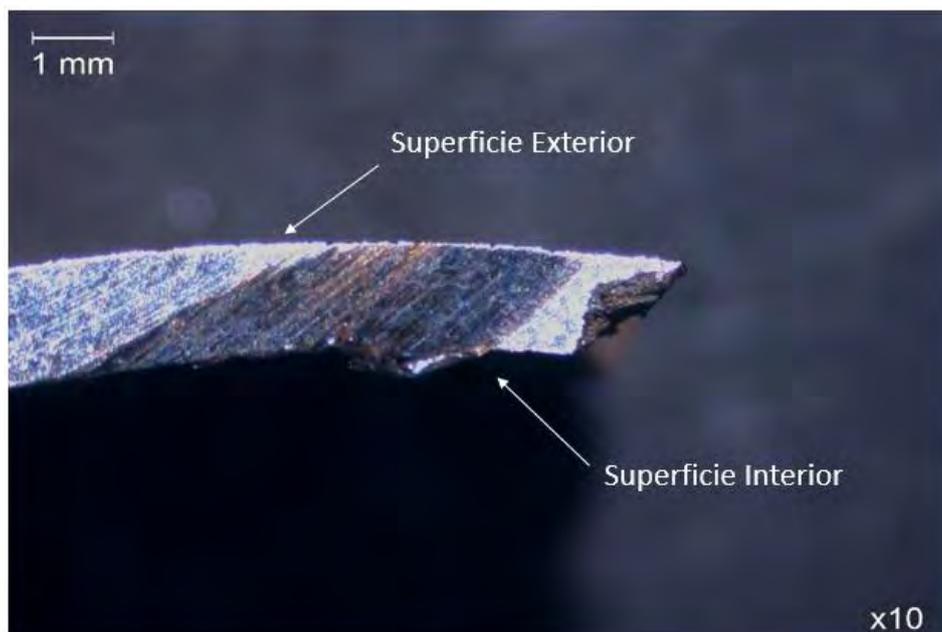


Figura 3.7 - Vista frontal de la sección.

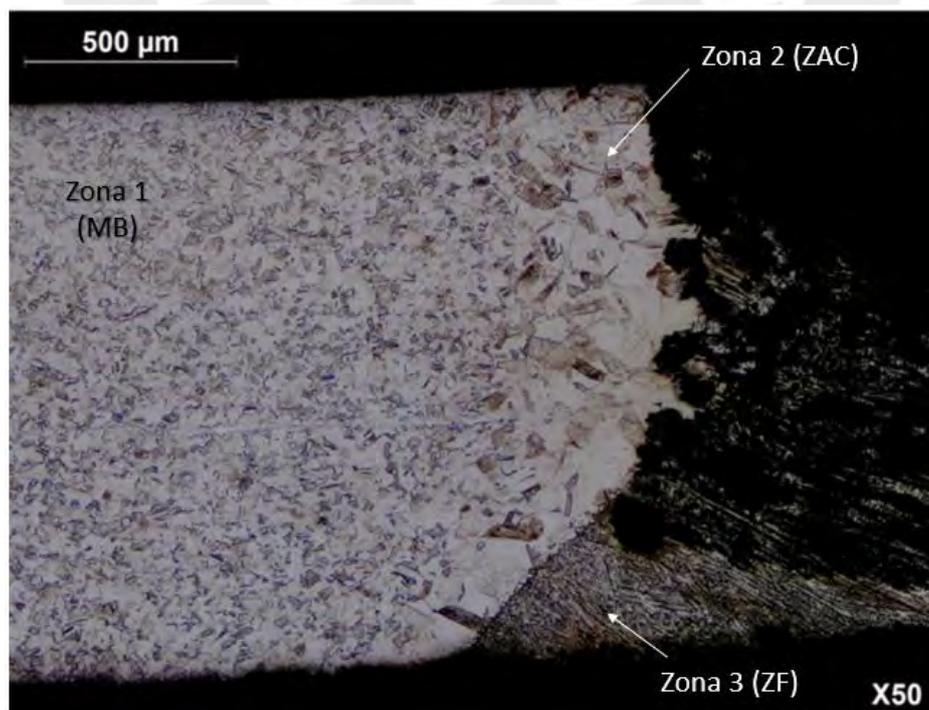


Figura 3.8 - Sección atacada de la corrosión longitudinal - 50X - Reactivo: ácido oxálico.

Se presenta la sección ya atacada en la figura 3.8, se pueden observar 3 zonas principales. La primera correspondería al material base (MB) descrito anteriormente, y se observa una estructura de granos de equiaxiales de austenita, microestructura típica de esta aleación. En segundo lugar, se observa una zona afectada por el calor (ZAC), donde se muestran granos más grandes de austenita, que han crecido como consecuencia del ciclo térmico producido durante la soldadura, propio del proceso de fabricación de este componente.

Finalmente se observa la costura del codo (ZF), la cual se diferencia principalmente ya que presenta una microestructura austenítica-ferrítica, adicionalmente se puede observar cómo esta última zona (ZF) presenta una corrosión agresiva y bastante selectiva en comparación a las demás zonas, debido a su naturaleza bifásica, que se constituye como el punto de inicio de la corrosión longitudinal. La figura 3.9 se muestra una sección más alejada de la costura del codo de estudio y por tanto de la zona fallada, observa pequeños puntos correspondientes a picaduras por corrosión en lo que corresponde material base. Esto señala que la corrosión no sólo se produjo de manera selectiva en el cordón longitudinal del codo, sino que en el mismo material base en forma de picaduras, aunque de una manera menos severa

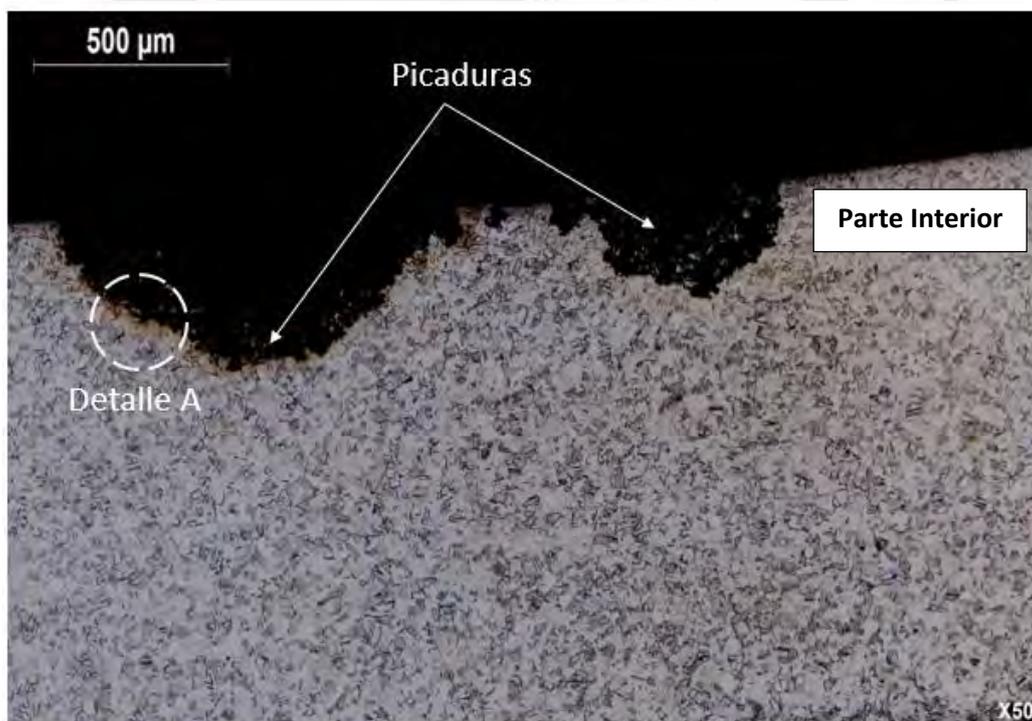


Figura 3.9 - Sección próxima a la costura del codo – 50X – Reactivo: ácido oxálico.

En la figura 3.10 se puede observar con mayor detalle las picaduras antes mencionadas, y se observa que esto corresponde a una zona donde el material de la tubería está completamente sano (zona lejos de la soldadura).

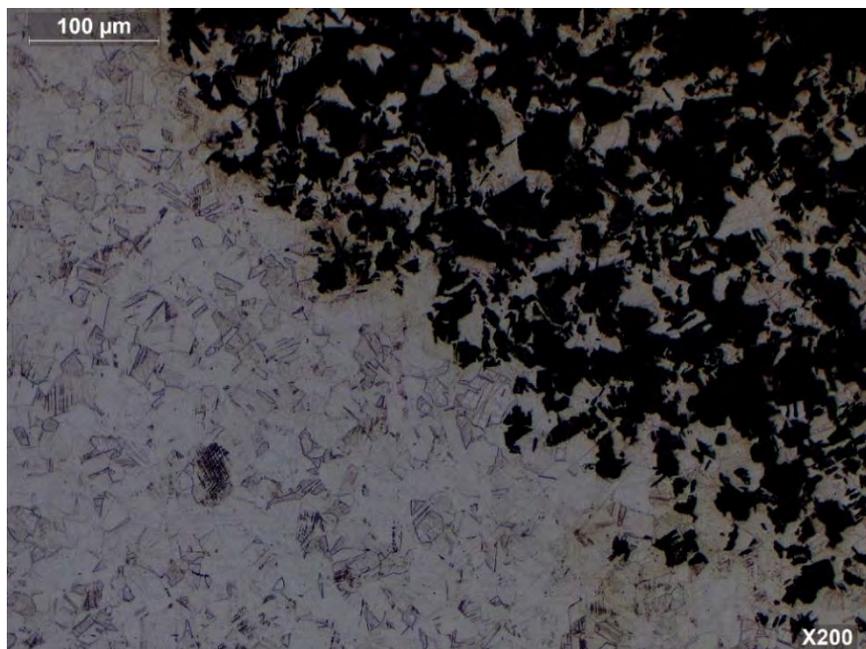


Figura 3.10 - Detalle “A” de picadura en la parte interna del componente de estudio en contacto con ácido carmínico – 200X – Reactivo: ácido oxálico

- Cordón circunferencial

Para el análisis de la corrosión circunferencial se extrajo una sección de la parte final de esta, figura 3.11, a continuación, se presenta.

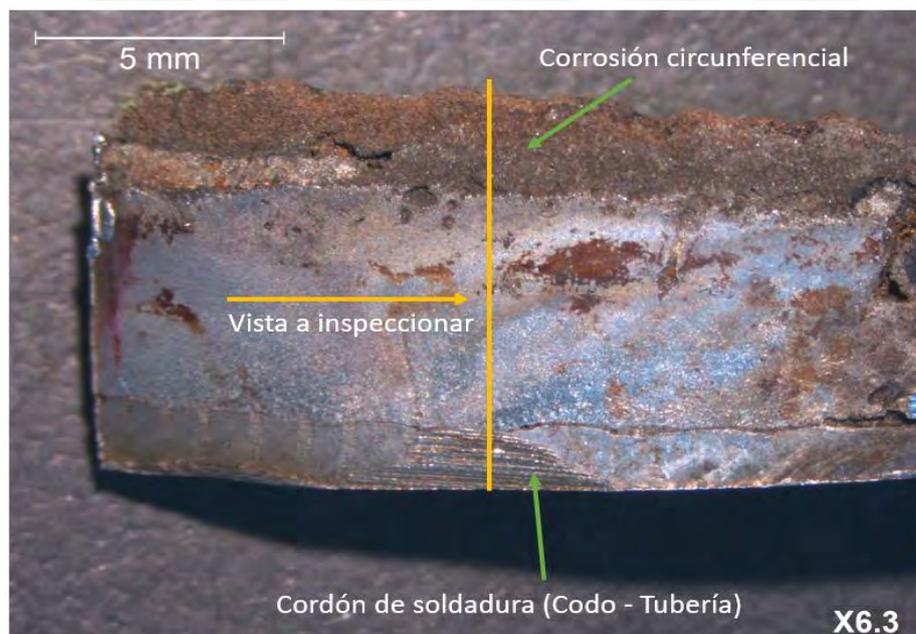


Figura 3.11 - Sección correspondiente de la corrosión circunferencial.

La figura 3.12 muestra la sección transversal de la muestra extraída de la zona de cordón circunferencial, una vez atacada. Se puede observar también las tres zonas características de una unión soldada (ZF, ZAC, MB), sin embargo, la zona afectada por el calor (ZAC) es más amplia en comparación a la anterior (cordón longitudinal).

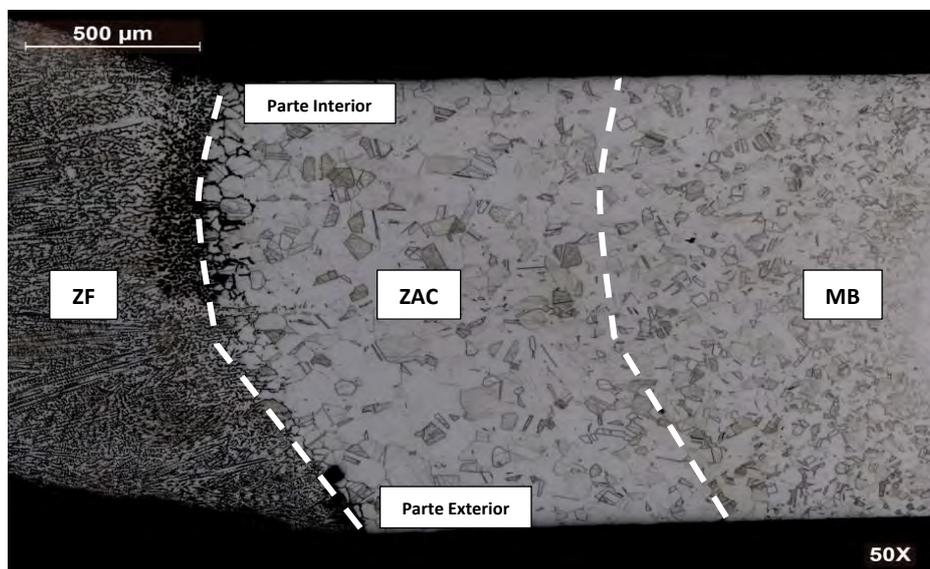


Figura 3.12 - Vista de la microestructura en la unión codo – tubería - 50X- Reactivo: ácido oxálico.

Además, se aprecia una zona “sensibilizada” en la ZAC (zona afectada por el calor a elevada temperatura) que está muy próxima a la zona de fusión (ZF), donde se observa una corrosión selectiva de los límites de grano (figuras 3.12 y 3.13), que corresponde al mecanismo de corrosión intergranular, que se origina por la precipitación de carburos de cromo en los límites de grano de la austenita.

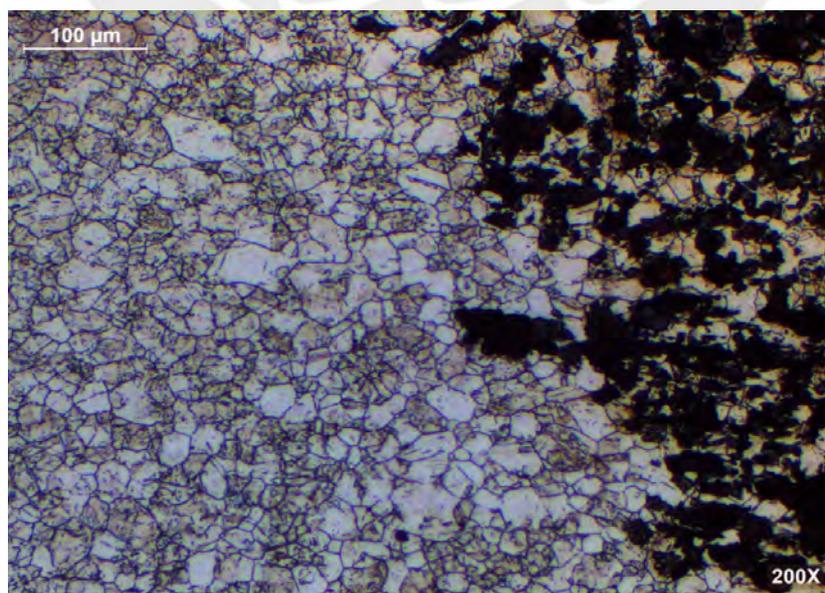


Figura 3.13 - Vista de la sección corroída – 200X – Reactivo: ácido oxálico.

Adicionalmente se presente la interfaz entre la zona sana del material y la zona donde se aprecia la sensibilización del material debido a la formación de carburos (figura 3.14), para poder apreciar de mejor manera las diferencias en la morfología de la microestructura.



Figura 3.14 - Sección donde se muestra el cambio en la morfología – 100X – Reactivo: ácido oxálico.

Con base a lo expuesto anteriormente, se puede indicar lo siguiente:

- Respecto a la corrosión longitudinal, correspondiente a la costura del codo, se observa una corrosión bastante selectiva, donde se corroe principalmente la ferrita, presente en la zona de fusión (ZF) y que se da a lo largo de todo el accesorio (codo). Adicionalmente se determinó, de acuerdo con lo mostrado en la figura 3.7, la corrosión se inició al interior del accesorio como consecuencia de su exposición al ácido carmínico.
- Referente a la corrosión circunferencial, se observa una fuerte formación de carburos en la ZAC de la unión soldada que produjo la sensibilización del material y su corrosión (intergranular) posterior cuando estuvo en contacto con el ácido carmínico en operación. Esta sensibilización obedece a un ciclo térmico de soldadura que tiene un origen y un sentido de propagación fuertemente marcado por el procedimiento de soldadura empleado. Es decir, el procedimiento de soldadura puede haber provocado una mayor o menor sensibilización y por tanto una mayor tendencia a la corrosión intergranular.

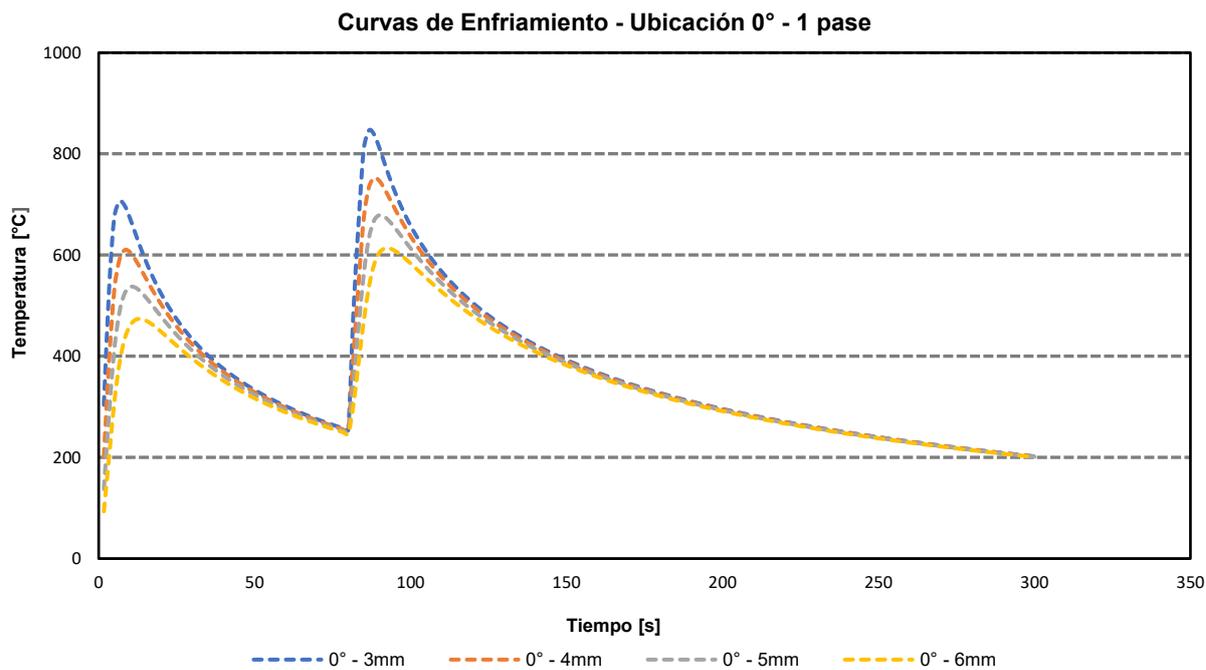


Figura 3.16 - Curvas de enfriamiento en la ubicación de 0° a diferentes distancias – 1 pase.

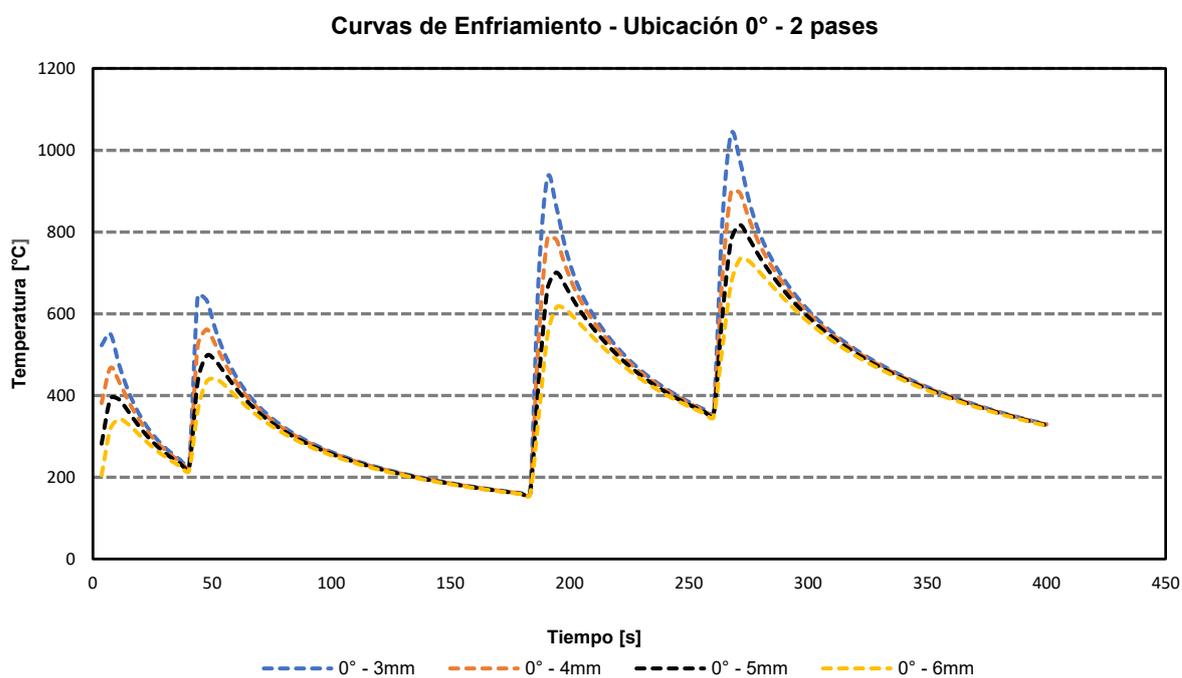


Figura 3.17-Curvas de enfriamiento en la ubicación de 0° a diferentes distancias – 2 pases.

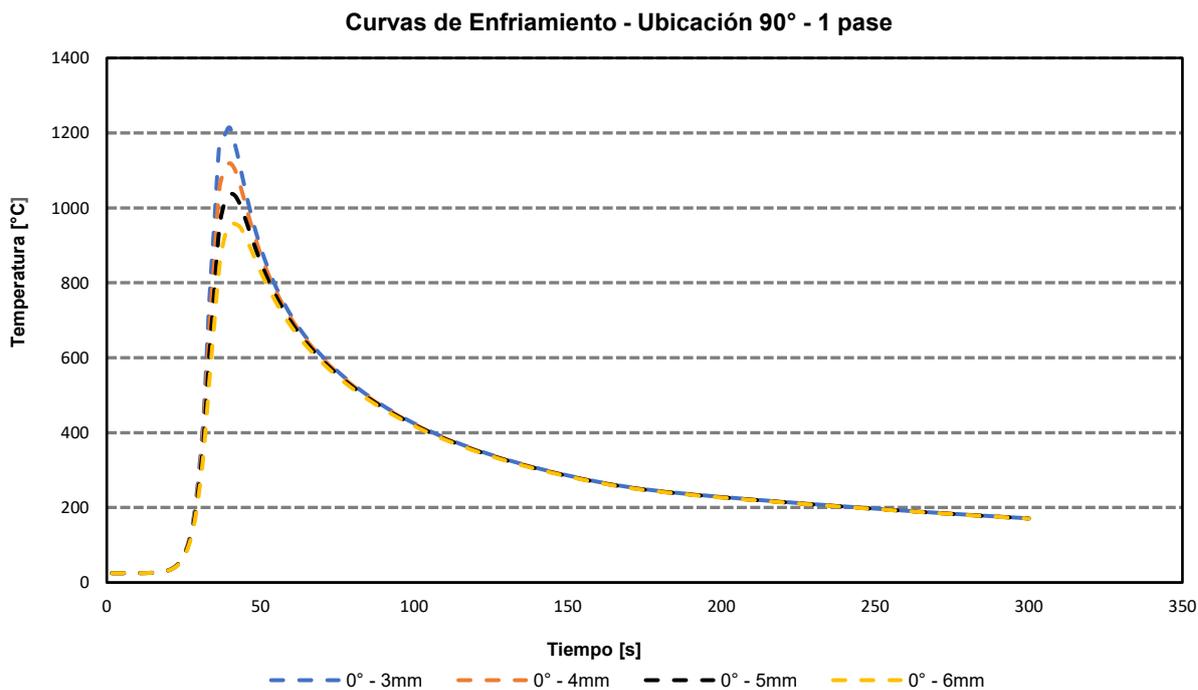


Figura 3.18 - Curvas de enfriamiento en la ubicación de 90° a diferentes distancias – 1 pase.

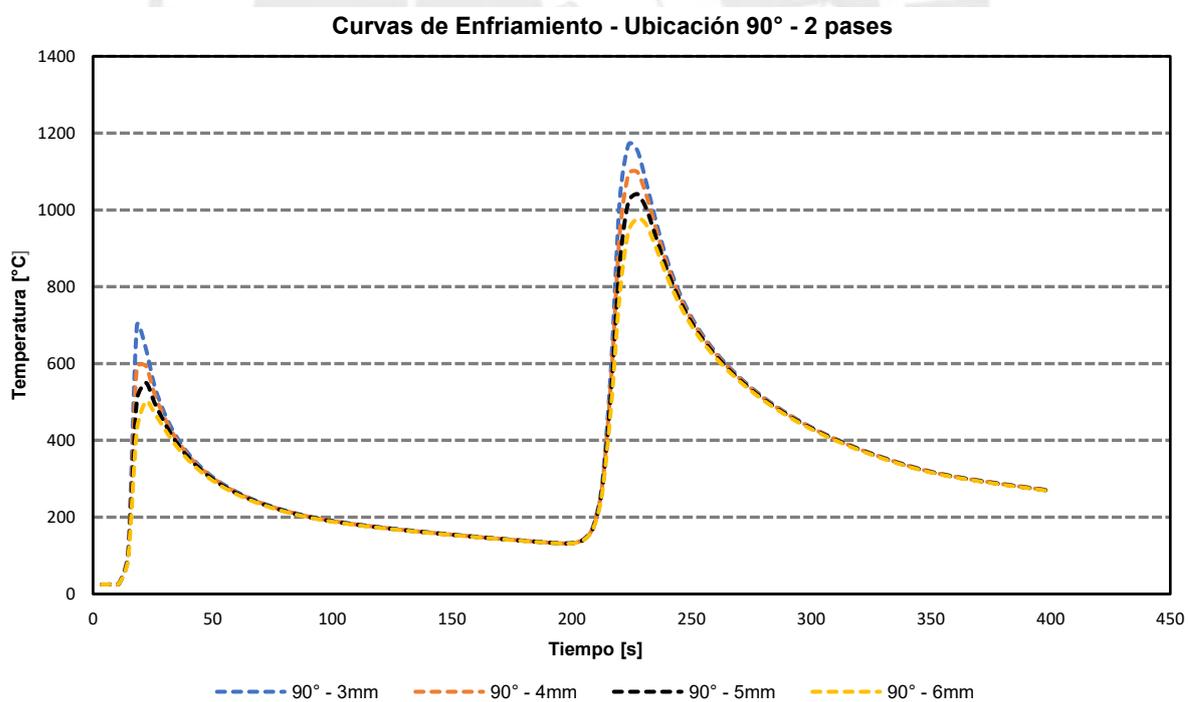


Figura 3.19 - Curvas de enfriamiento en la ubicación de 90° a diferentes distancias – 2 pases.

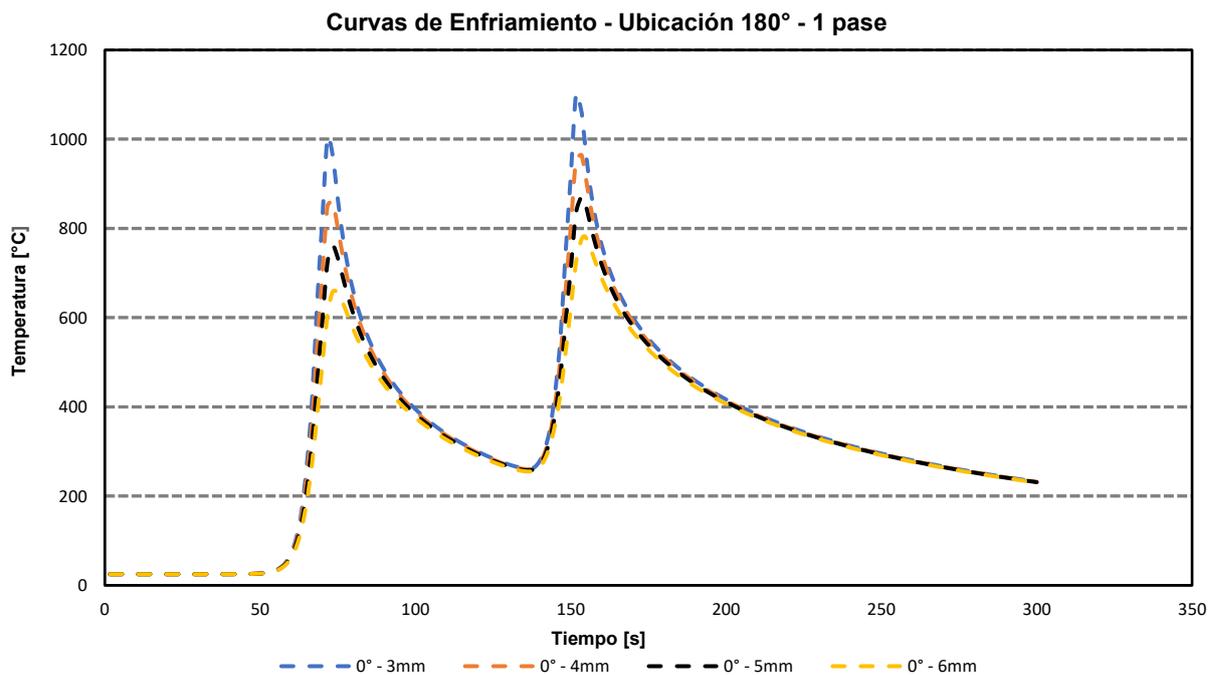


Figura 3. 20 - Curvas de enfriamiento en la ubicación de 180° a diferentes distancias – 1 pase.

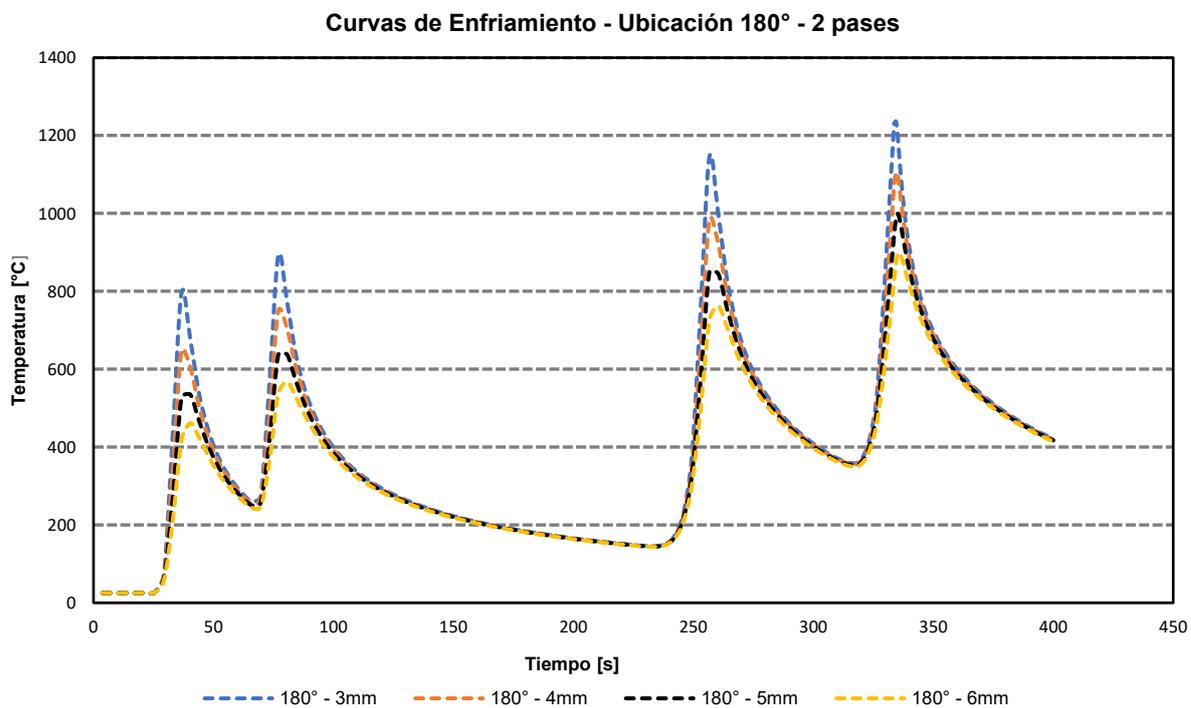


Figura 3. 21 - Curvas de enfriamiento en la ubicación de 180° a diferentes distancias – 2 pases.

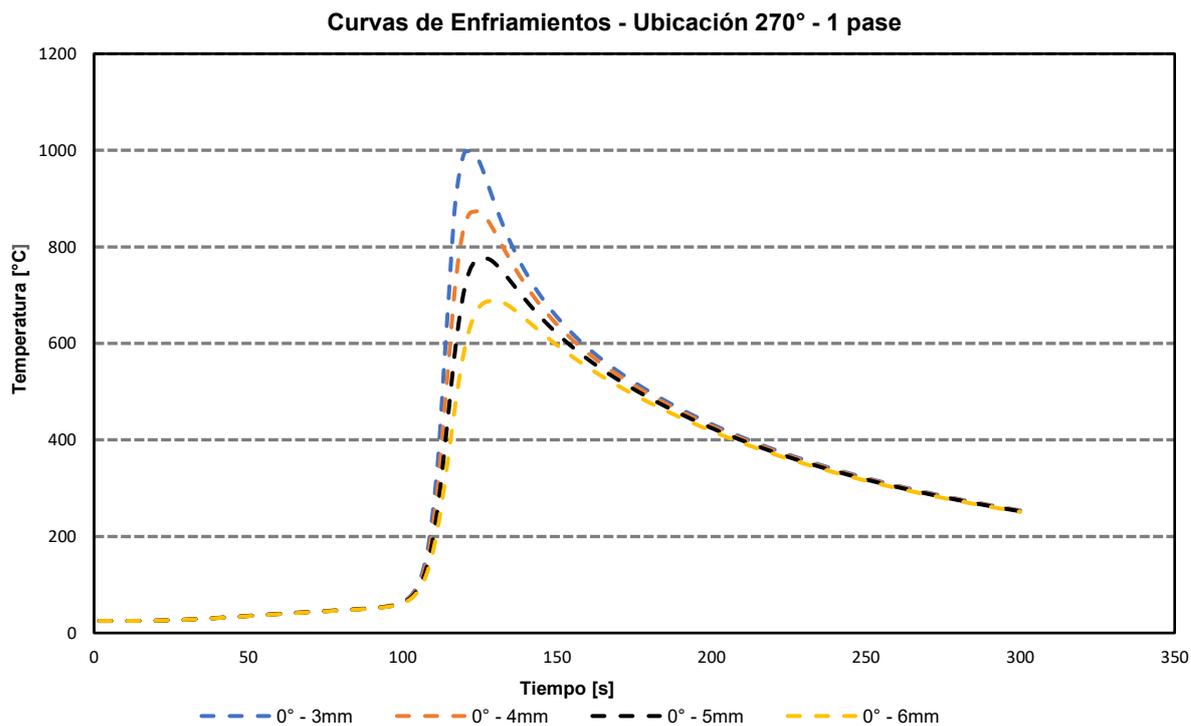


Figura 3. 22 - Curvas de enfriamiento en la ubicación de 270° a diferentes distancias – 1 pase.

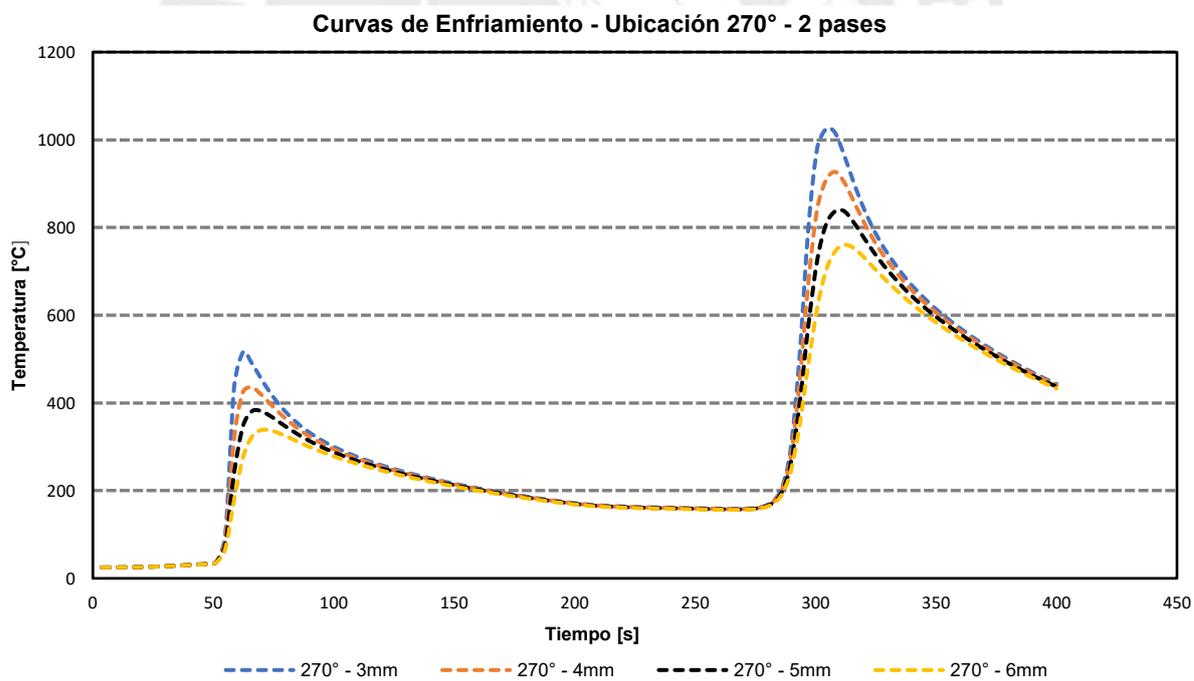


Figura 3. 23 - Curvas de enfriamiento en la ubicación de 270° a diferentes distancias – 2 pases.

Antes de iniciar el proceso de análisis de las gráficas mostradas anteriormente, resulta pertinente mostrar a continuación las siguientes figuras 3.24 y 3.25, que fueron extraídas del artículo “*A new numerical model to predict welding-induced sensitization in SUS304 austenitic stainless steel joint*”, en dicho estudio, realizado por Guangjie Feng [36], se planteó el análisis uniendo mediante un proceso de soldadura GTAW planchas de AISI SAE 304 de 10 mm de espesor y empleando hasta 5 pases.

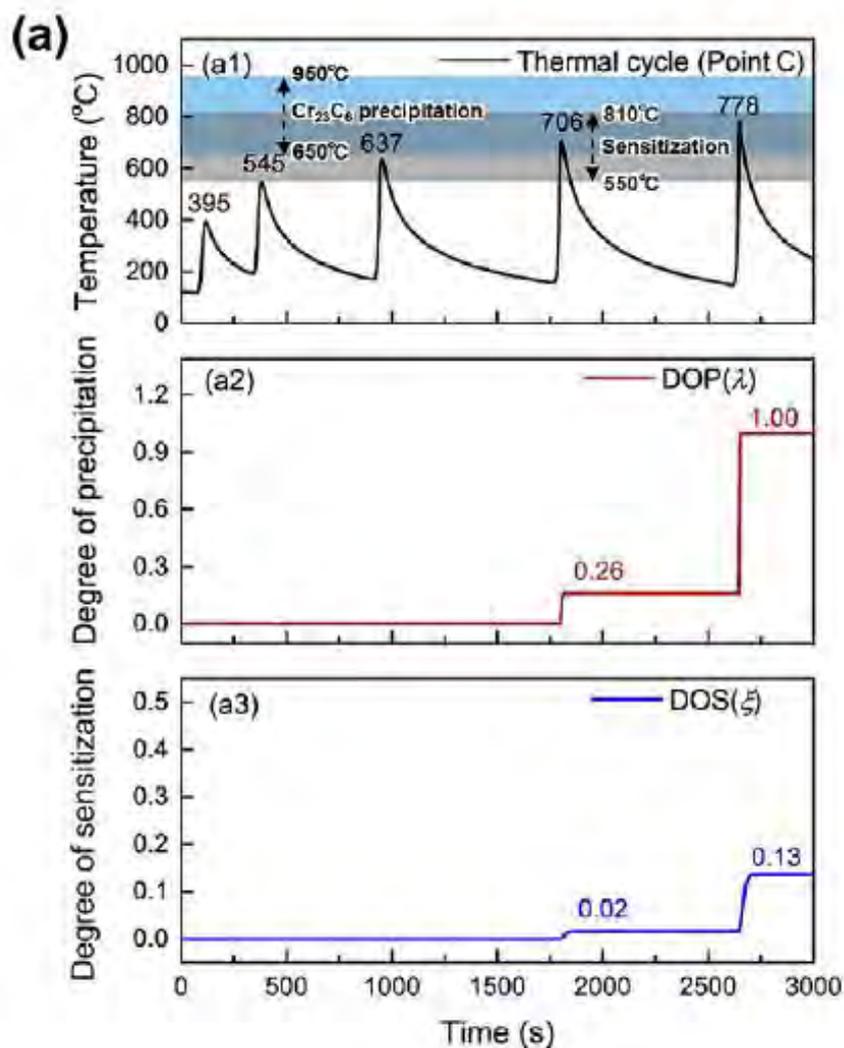


Figura 3. 24 - Variación de la temperatura, grado de precipitación (DOP) y grado de sensibilización (DOS) correspondiente al punto “C” - Tomado de “New Numerical model to predict welding-induced sensitization in SUS304 austenitic stainless Steel joint” por Guangjie [36]

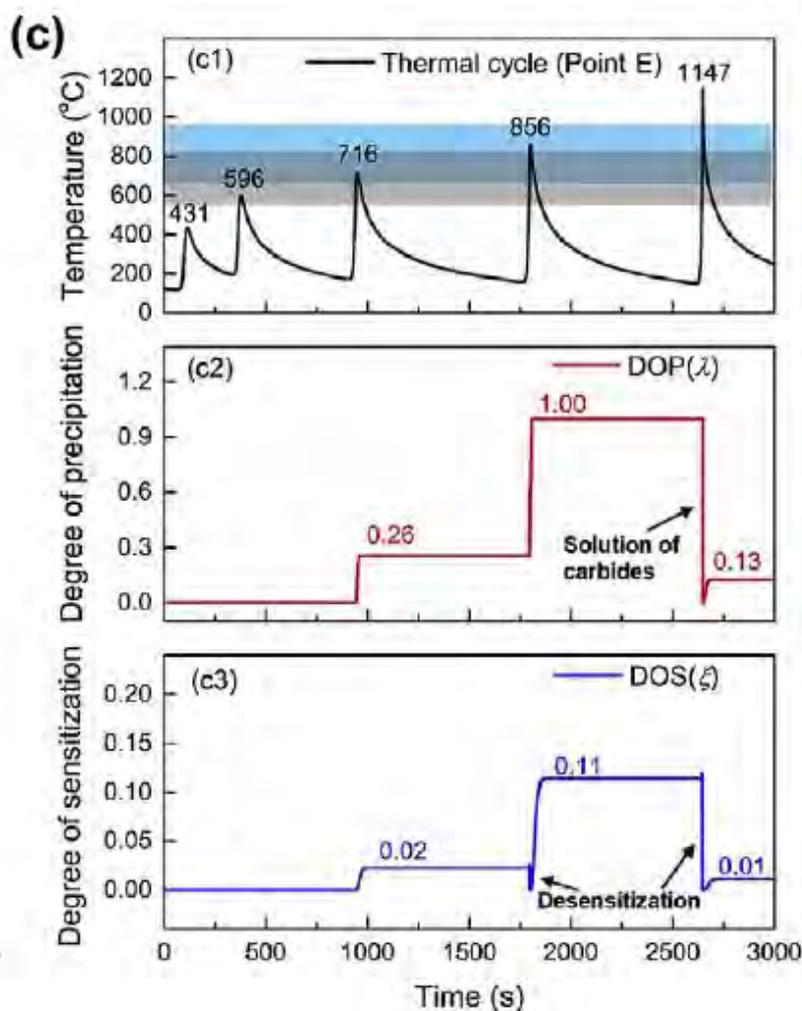


Figura 3. 25 - Variación de la temperatura, grado de precipitación (DOP) y grado de sensibilización (DOS) correspondiente al punto "E" - Tomado de "New Numerical model to predict welding-induced sensitization in SUS304 austenitic stainless Steel joint" por Guangjie [36]

Es importante destacar ciertos rangos de temperaturas críticas en el estudio, se diferencia claramente entre rangos de formación de carburos los cuales están entre [650 °C - 950 °C] y rangos de sensibilización entre [550 °C - 810 °C], la diferencia entre ambos conceptos ha sido explicada anteriormente, también se estima que se genera un fenómeno acumulativo ya que para cada pico de (superior al anterior) temperatura crítica irá aumentando el grado de sensibilización, por otra parte es importante mencionar que cuando se alcanzan valores superiores a 1000 °C, el grado de sensibilización mostrado se reduce drásticamente, como se resalta en la parte en la figura 3.25, dado que a estas temperaturas el carburo tiende a disolverse. Si bien las condiciones empleadas en el estudio difieren, tanto en el espesor como en el aporte de calor, se empleará como punto de partida para estimar, de acuerdo con las gráficas obtenidas, que en aquellas distancias donde se alcanzaron estas

temperaturas, se espera encontrar ciertos grados de sensibilización de acuerdo con las temperaturas simuladas.

Para el primer grupo de curvas ubicadas en 0° , correspondientes a las figuras 3.16 y 3.17, la cual corresponde del inicio de la soldadura, se observa que para el primer pase, no llega a temperaturas críticas, y en caso que alcance se puede estimar que es bajo el tiempo de permanencia, sin embargo al realizar el análisis para 2 pases se observa que el tiempo de permanencia es mayor y considerando también el efecto acumulativo indicado anteriormente, se estima cierto grado de sensibilización considerable entre 4 mm y 5mm y que para zonas de 3 mm se estima un bajo grado de sensibilización dado que a esas temperaturas tiene el carburo a disolverse, por otro lado a 6 mm se puede observar que no llega por completo a temperaturas críticas. Para el segundo grupo de curvas, referente a 90° , correspondientes a las figuras 3.18 y 3.19, se observa que, de igual manera, para un solo pase el tiempo de permanencia en temperaturas críticas sería bajo, motivo por el cual no podría generar grados de sensibilización críticos. Por otro lado, al analizar las curvas correspondientes a 2 pases se observa que para todas las distancias de 3 mm a 6 mm las temperaturas alcanzadas están cercanas a 1000°C , por lo que se espera grados de sensibilización relativamente bajos debido a que se estarían solubilizando estos carburos.

Para el tercer grupo de curvas, referente a 180° , correspondientes a las figuras 3.20 y 3.21, se puede tener la misma consideración que se tuvo para las gráficas obtenidas a 0° , dado que el comportamiento de estas es bastante similar, solo con la diferencia que para 180° se registran rangos máximos de temperaturas superior, adicionalmente se estima encontrar el grado de sensibilización máximo a una distancia de 5 mm.

Finalmente, para las curvas obtenidas en 270° , correspondientes a las figuras 3.22 y 3.23, se considera un comportamiento similar a las obtenidas en 90° , sin embargo, se tiene una diferencia considerable cuando se analiza para 2 pases, ya que en este caso para las distancias de 4 mm a 5 mm no llegan a temperaturas donde se disuelvan los carburos, motivo por el cual se esperarían grados de sensibilización considerables en estas regiones.

La simulación del ciclo térmico de las uniones soldadas permite concluir que la zona del material ubicado en la posición 180° y a una distancia de 5 mm sería la condición más crítica desde el punto de vista de sensibilización cuando se aplican dos pases de soldadura, generando así un ciclo térmico muy severo.

Esto además es concordante con los resultados obtenidos en el estudio de Guangjie Feng que se presenta la figura 3.26.

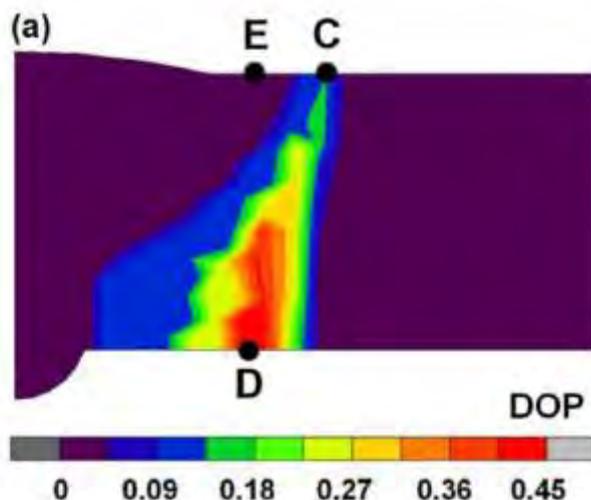


Figura 3.26 - Distribución de la temperatura - Tomado de “New Numerical model to predict welding-induced sensitization in SUS304 austenitic stainless Steel joint” por Guangjie Feng [36].

Según el esquema mostrado, el punto “E” está más cercano al cordón de soldadura, y llega a mayores temperaturas en comparación al punto “C”, y son estas condiciones las cuales permiten la formación de una zona sana entre el cordón de soldadura y la región sensibilizada, lo cual es congruente como con lo visto en la metalografía del accesorio de estudio.

3.5 Ensayo de Polarización (EPR-DL)

Se muestra a continuación, en la figura 3.27, la variación del grado de sensibilización a las distancias ya indicadas anteriormente. Se muestra la variación el grado de sensibilización a 3 mm en las diferentes posiciones.

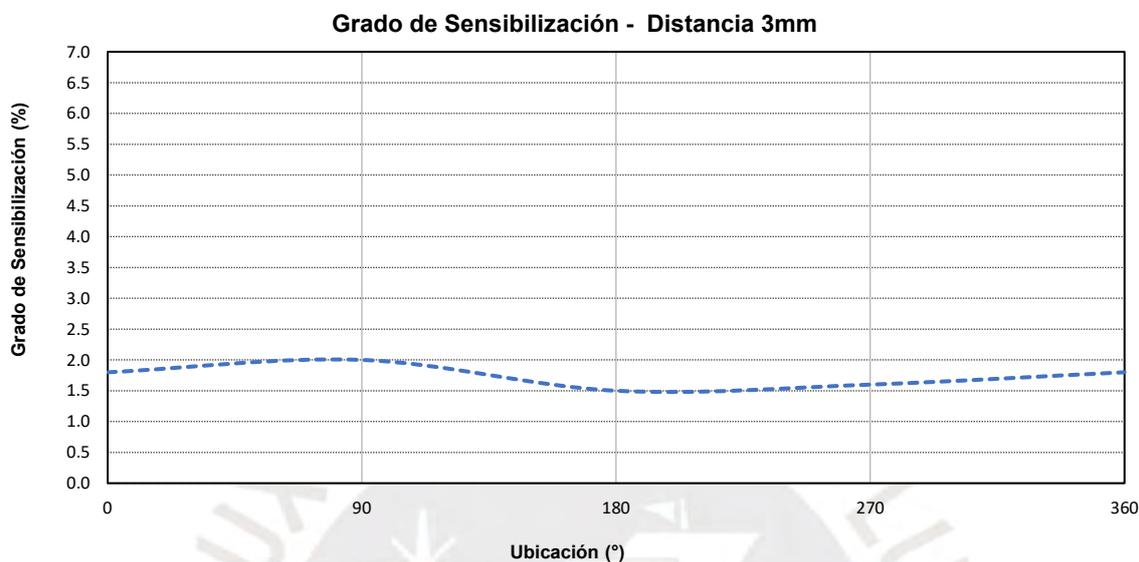


Figura 3.27 - Variación del grado de sensibilización a 3 mm.

De la gráfica mostrada anteriormente, se puede indicar que, en esta zona, existe un grado de sensibilización promedio de 1.7%, donde no se observa gran variación entre las 4 ubicaciones estudiadas, se muestra adicionalmente en la figura 3.28 la metalografía para el valor de 180°, el cual tiene un valor de 1.5% (ligeramente sensibilizado, según norma ISO 12732 -2006).

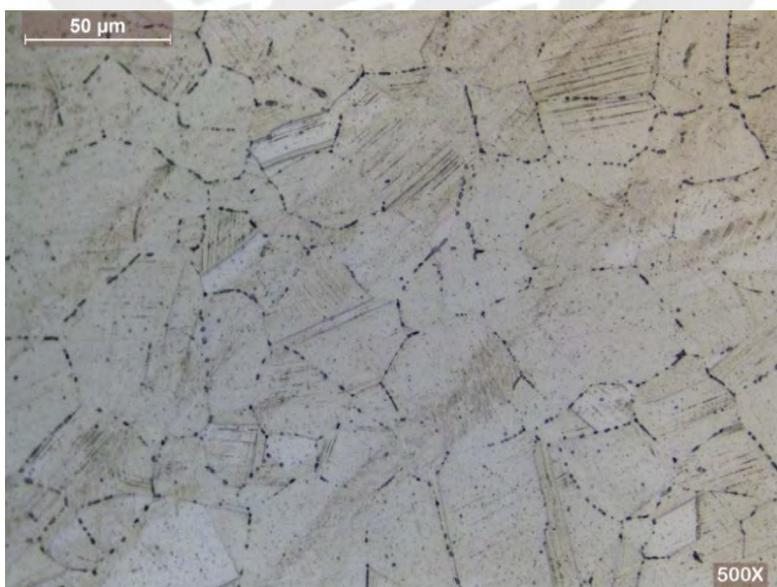


Figura 3.28 - Microestructura a 3 mm y ubicación 180° - 500X – Reactivo: ácido oxálico.

La figura 3.29 muestra la variación el grado de sensibilización a 4 mm del cordón de soldadura en las diferentes posiciones.

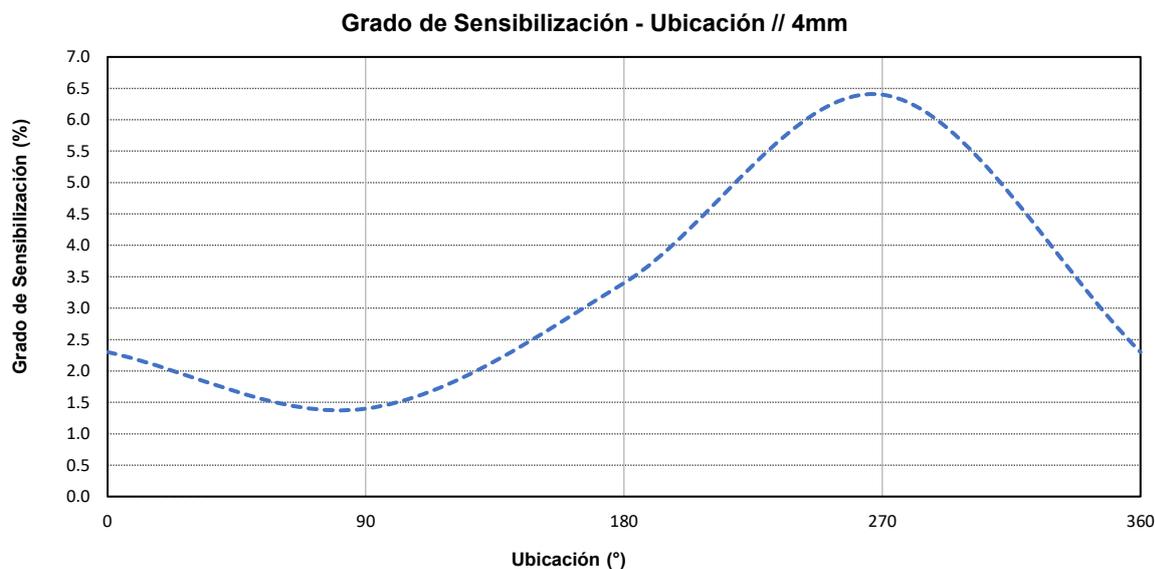


Figura 3.29 - Variación del grado de sensibilización a 4 mm.

De la gráfica mostrada anteriormente, se puede observar una variación marcada en las diferentes ubicaciones estudiadas, encontrando un valor máximo de 6.4% en la ubicación de 270°, zona que estaría sensibilizada según la norma empleada, adicionalmente se tiene un valor promedio de 3.16% para esta ubicación. Se muestra en la figura 3.30 la microestructura para el valor de 180°, el cual tiene un valor de 3.4% (ligera mente sensibilizado, según norma ISO 12732 -2006).

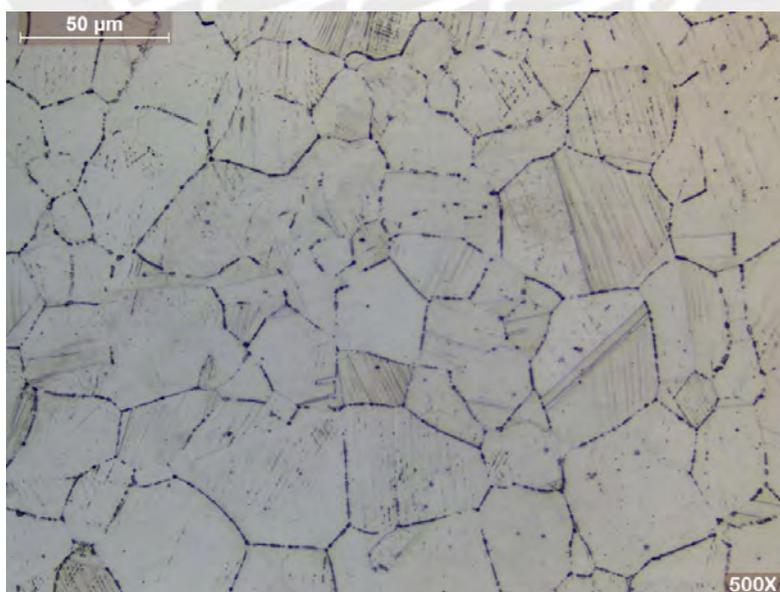


Figura 3.30 - Microestructura a 4 mm y ubicación 180° - 500X - Reactivo: ácido oxálico.

La figura 3.31 muestra la variación del grado de sensibilización a 5 mm en las diferentes posiciones.

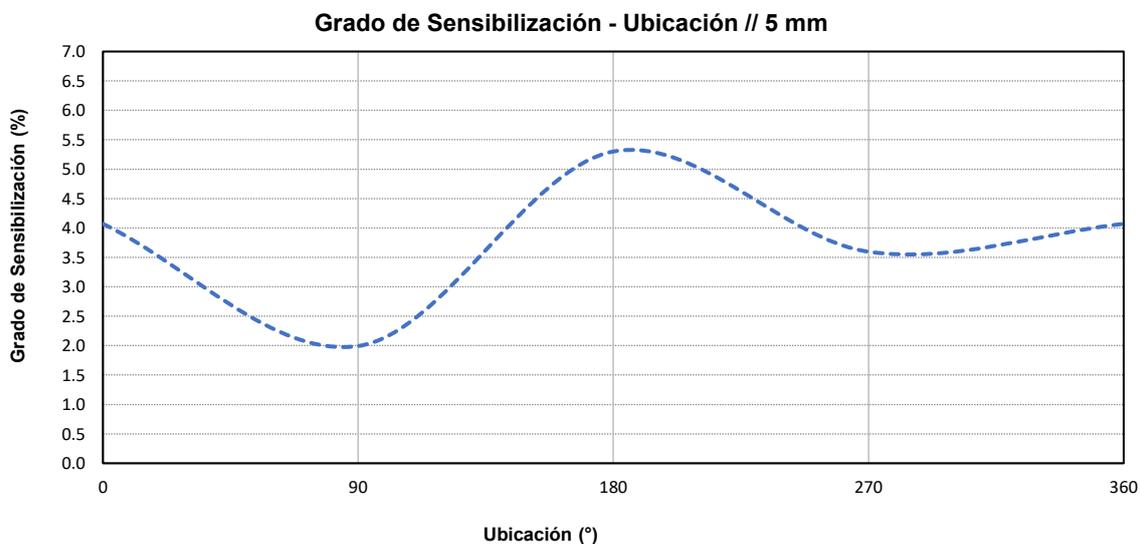


Figura 3.31 - Variación del grado de sensibilización a 5 mm

De la gráfica mostrada anteriormente, se puede observar una variación marcada en las diferentes ubicaciones estudiadas, encontrando un valor máximo de 5.5 % en la ubicación de 180°, zona que ya se encuentra sensibilizada según la norma empleada, adicionalmente se tiene un valor promedio de 3.7% para esta ubicación. La figura 3.32 muestra la microestructura para el valor de 180°, el cual tiene un valor de 5.5% (sensibilizado, según la norma ISO 12732 - 2006)

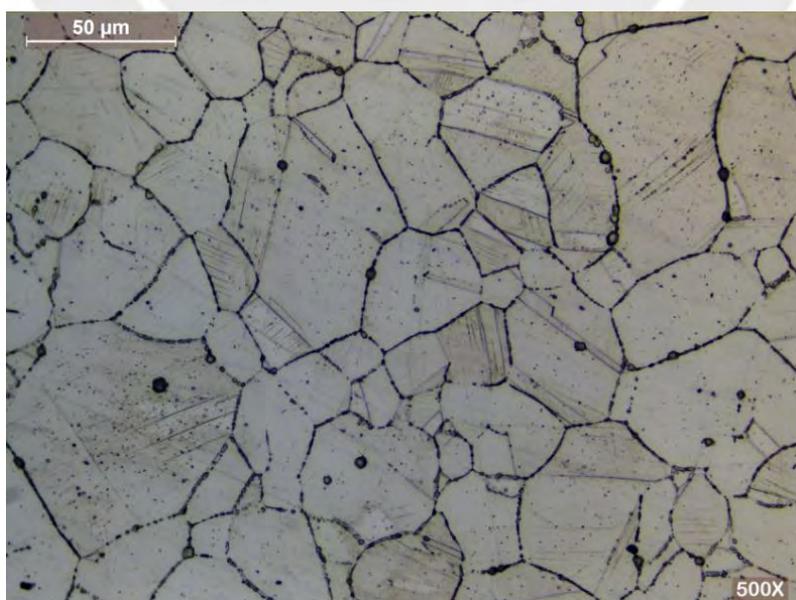


Figura 3.32 - Microestructura a 5 mm y ubicación 180° - 500X - Reactivo: ácido oxálico.

La figura 3.33 muestra la variación del grado de sensibilización a 6 mm en las diferentes posiciones.

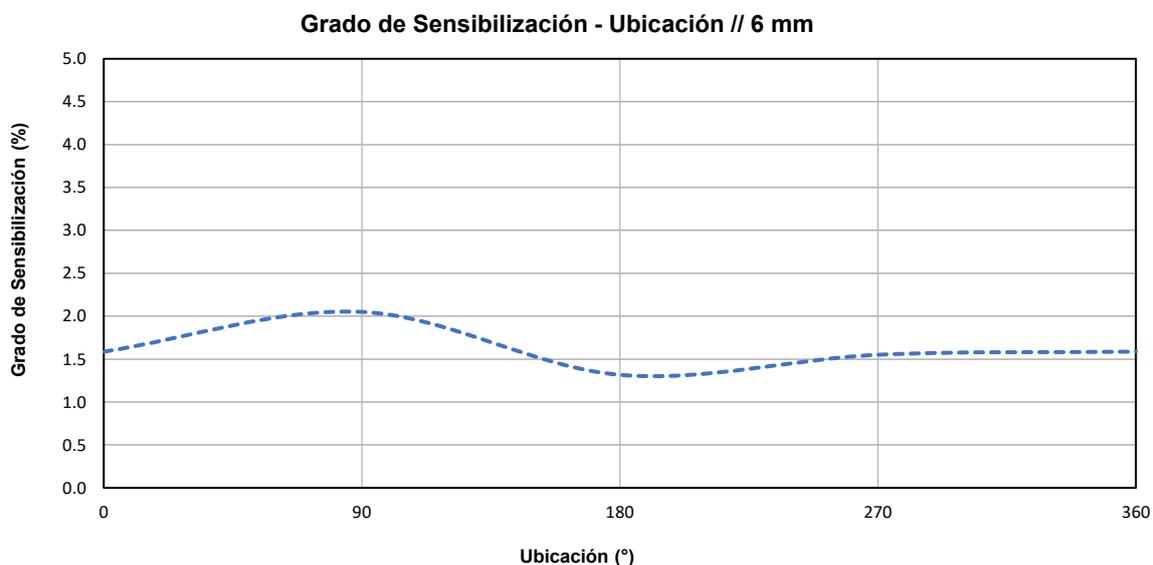


Figura 3.33 - Variación del grado de sensibilización a 6mm.

De la gráfica mostrada anteriormente, se observa que, en esta zona, existe un grado de sensibilización promedio de 1.5%, donde no se observa gran variación entre las 4 ubicaciones estudiadas, se muestra adicionalmente en la figura 3.34 muestra la microestructura para el valor de 180°, el cual tiene un valor de 1.3% (ligeramente sensibilizado, según norma ISO 12732 -2006).

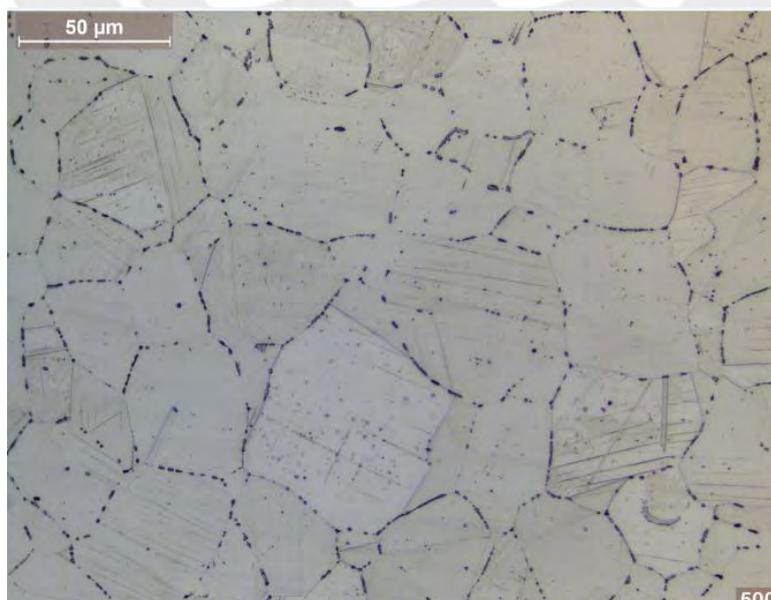


Figura 3.34 - Microestructura a 6 mm y ubicación a 180° - 500X – Reactivo: ácido oxálico

La figura 3.35 permite observar la variación del grado de sensibilización en función de las 4 distancias analizadas anteriormente.

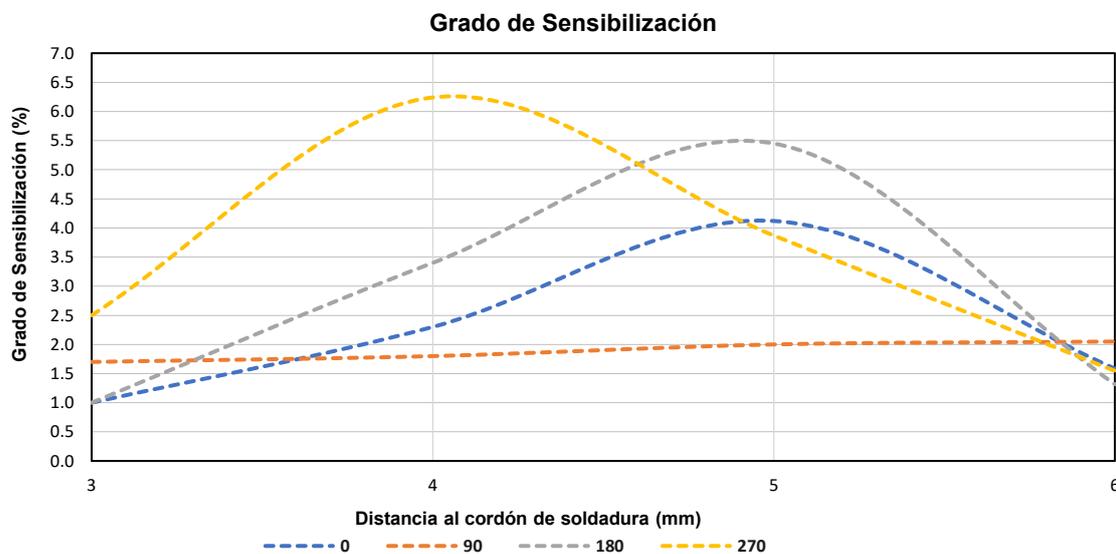


Figura 3. 35 - Variación del grado de sensibilización a diferentes distancias

De esta gráfica se concluye que los máximos para cada posición del codo se ubican en dos distancias diferentes, para la ubicación de 270° el máximo se ubica cercano a una distancia de 4 mm, y para las ubicaciones de 0° y 180° corresponde a una distancia cercana a 5 mm.

Se resalta adicionalmente un valor casi constante para la ubicación de 90° donde se observa un valor casi constante de 1.8%.

Es importante mencionar que los máximos en cada caso corresponden a 6.5% en la ubicación de 270° y en 5.5% en la ubicación de 180°, en ambos casos, estas zonas se encuentran sensibilizadas según la norma ISO 12732 – 2006.

Con la información obtenida de los ensayos de reactivación electroquímica se procede a analizar referente al codo de estudio.

Sin embargo, antes de realizar el análisis respectivo, se resalta, con la información previamente expuesta, se desea reforzar la idea indicada en este procedimiento, en donde en función de la metalografía podemos estimar, en cierta medida, el grado de sensibilización que presentan los aceros inoxidable, para esto se muestra, en la figura 3.36, parte del estudio “Application of Double Loop Electrochemical Potentio-kinetic Reactivation for characterizing the intergranular corrosion susceptibility of stainless steels and Ni-based alloys in solar nitrate salts used in CSP systems” [37].

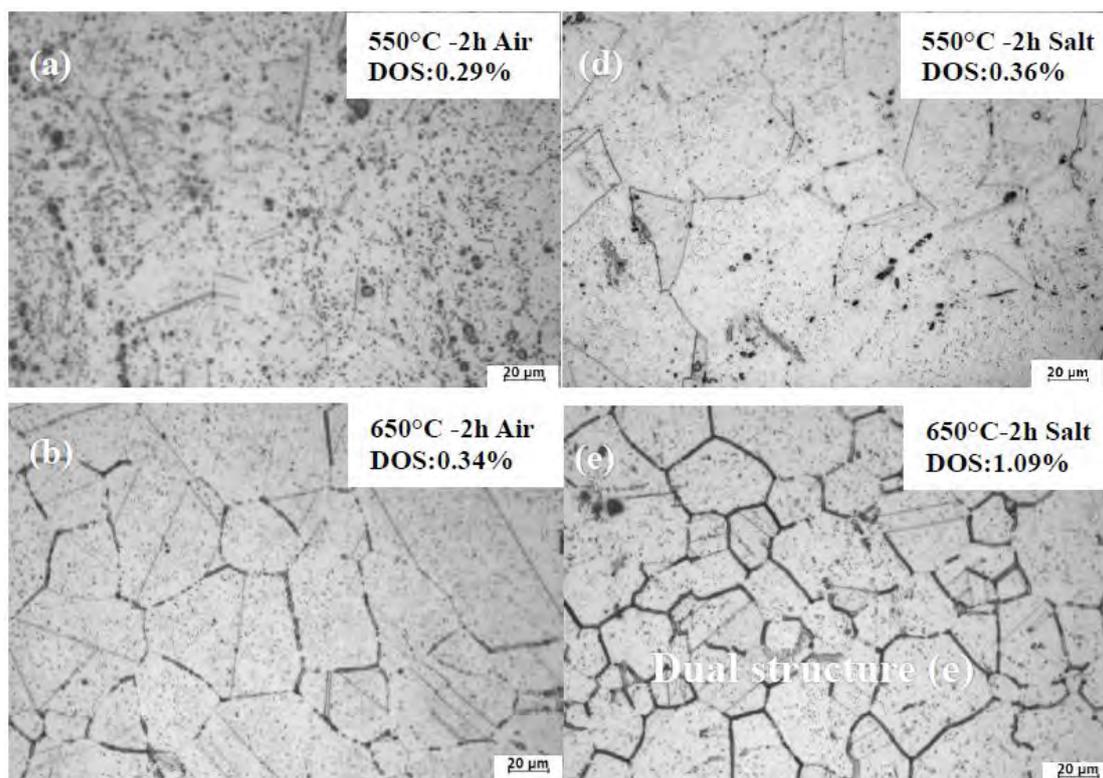


Figura 3.36 – Variación en las microestructuras del grado de sensibilización en un acero AISI SAE 347 – Tomado de Application of Double Loop Electrochemical Potentio-kinetic Reactivation for characterizing the intergranular corrosion susceptibility of stainless steels and Ni-based alloys in solar nitrate salts used in CSP systems [37].

Cabe destacar que el estudio indicado previamente corresponde, a condiciones donde el material ha permanecido a temperaturas entre 550 °C a 650 °C en un periodo de tiempo de 2 horas, asimismo el material mostrado corresponde a un acero inoxidable AISI SAE 347, y, sobre todo las condiciones de ensayo electroquímico han sido diferentes al del presente trabajo. Pero se resalta la relación entre el D.O.S y la microestructura [37] [38].



Figura 3. 37 - Componente de estudio

Es importante resaltar, como se indicó anteriormente, que producto de la inspección visual se obtuvo que el inicio de la corrosión en el codo corresponde o al final o al inicio de la soldadura (no se puede determinar con certeza ya que se esmeriló esta parte), adicionalmente, como se observa en la figura 3.37, es importante resaltar que la fisura circunferencial se encuentra a 5.71 mm de la línea de fusión.

Según las gráficas obtenidas mediante los ensayos EPR DL, la mayor región de sensibilización ocurre entre 4 y 5 mm, lo cual, si bien son valores cercanos al medido en el accesorio, es importante mencionar que no tiene por qué ser exactamente el mismo valor, medido anteriormente, dado que la simulación experimental de la soldadura se planteó con 2 pases para el cordón de soldadura (suponiendo un proceso de corrección), lo cual no necesariamente fue lo sucedido en el elemento de estudio.

Para sustentar lo mencionado anteriormente y resaltar la influencia que tiene el calor de aporte tanto en la ubicación como incluso en el valor máximo del grado de sensibilización, se presenta las curvas obtenidas en el estudio de Sousa Luz *“Use of double loop electrochemical potentiokinetic reactivation (DL-EPR) to evaluate the sensitization of austenitic steels after welding”* [14] en las figuras 3.38, 3.39 y 3.40.

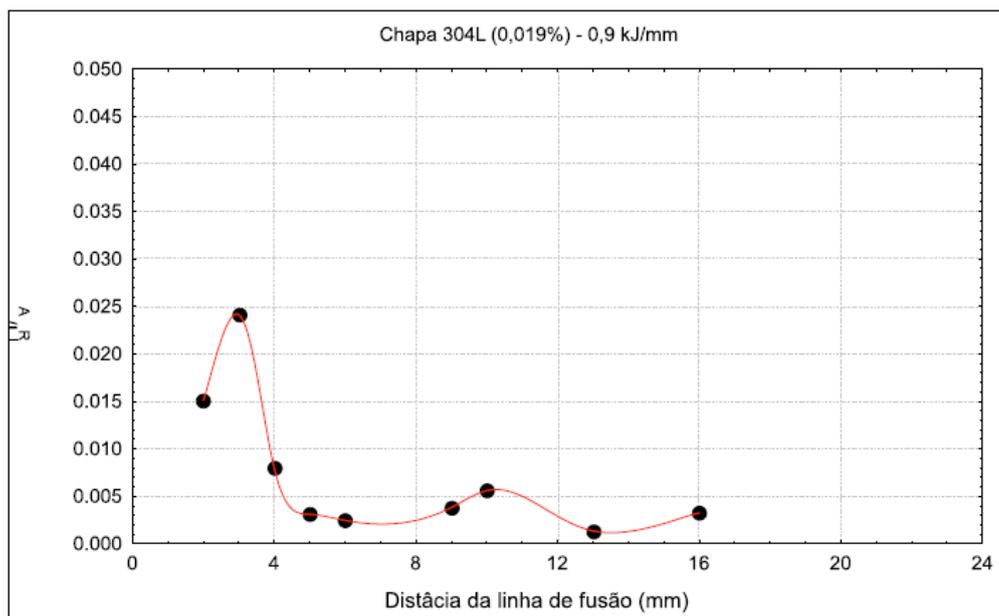


Figura 3. 38 - Variação do grau de sensibilização em função de la distancia y con un aporte de calor de 0.9 kJ/mm - Tomado de “Influencia das variaveis e do proceso de soldagem na sesitizao dos acos inoxidáveis austeníticos por acos inoxidáveis austeníticos” por Sousa Luz [14].

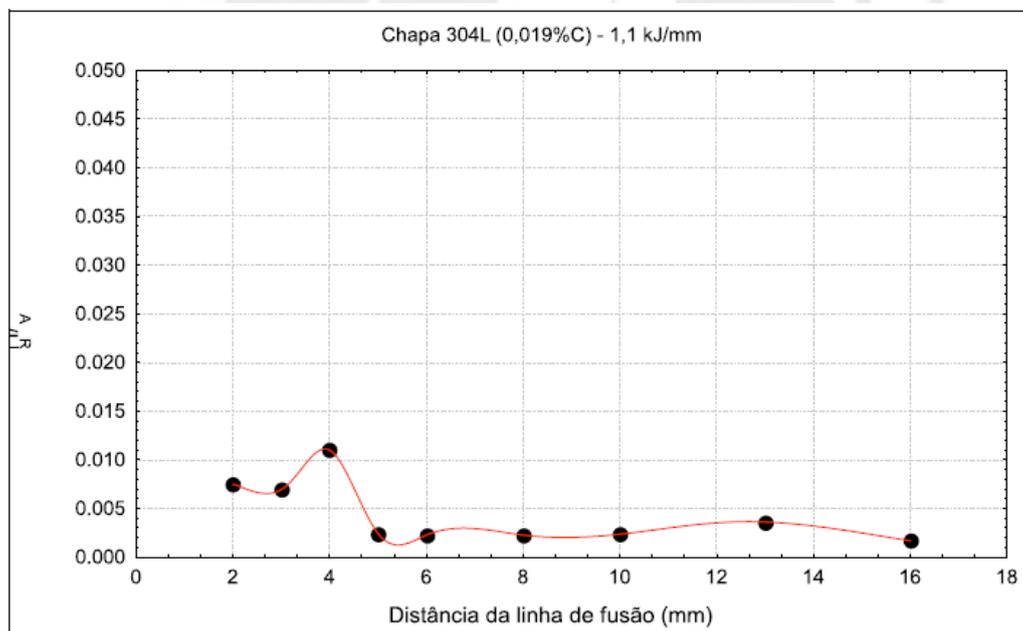


Figura 3. 39 - Variação do grau de sensibilização em função a la distancia y con un aporte de calor de 1.1 kJ/mm - Tomado de “Influencia das variaveis e do proceso de soldagem na sesitizao dos acos inoxidáveis austeníticos por acos inoxidáveis austeníticos” por Sousa Luz [14].

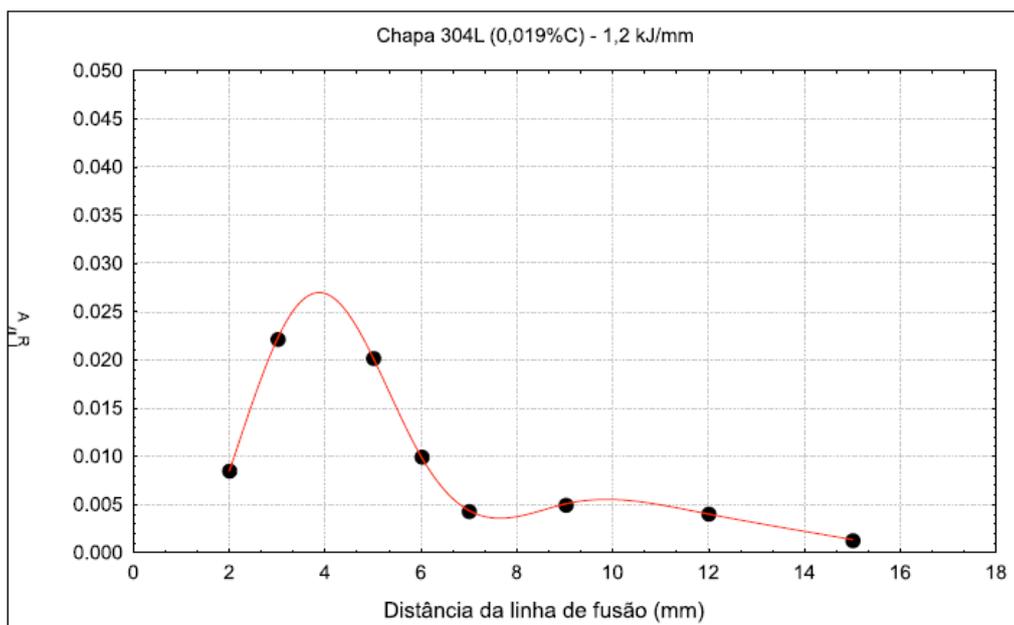


Figura 3. 40 - Variación del grado de sensibilización en función a la distancia con un aporte de calor de 1.2kJ/mm - Tomado de “Influencia das variaveis e do proceso de soldagem na sesitizao dos acos inoxidáveis austeníticos por acos inoxidáveis austeníticos” por Sousa Luz [14]

Es importante indicar que el procedimiento realizado en el estudio de Sousa Luz fue realizado con planchas de 3 mm de espesor y con diferentes materiales, sin embargo, solo se centrará el presente análisis en las del acero AISI SAE 304L. En estas gráficas mostradas se observa como con diferentes aportes de calor la zona de mayor sensibilización puede variar, desplazándose a otras distancias como 3 mm con un aporte de 0.9 kJ/mm a 4 mm con un aporte de 1.2 kJ/mm, e incluso se observa que para un valor intermedio de 1.1 kJ/mm el máximo valor de sensibilización varía.

Debido a esto se plantea que si bien los valores obtenidos de manera experimental no son exactamente los que fueron medidos en el accesorio (codo), incluso son menores, se puede estimar que el ciclo térmico al que fue sometido el codo durante la unión con la tubería fue más severo que el planteado en el presente estudio.

Por otro lado, resulta importante destacar que la fisura por corrosión del componente se propagó principalmente a 270° y muy poco a 90° (según se mostró en la figura 3.36), lo cual es coherente con las curvas obtenidas tanto en el ensayo EPR-DL como con la simulación térmica donde se esperaba grados de sensibilización menores, explicando así el origen de esta y el sentido de propagación.

3.6 Curvas de Polarización Anódica

Una vez realizado los ensayos de polarización anódica se presentan las figuras 3.41 y 3.42.

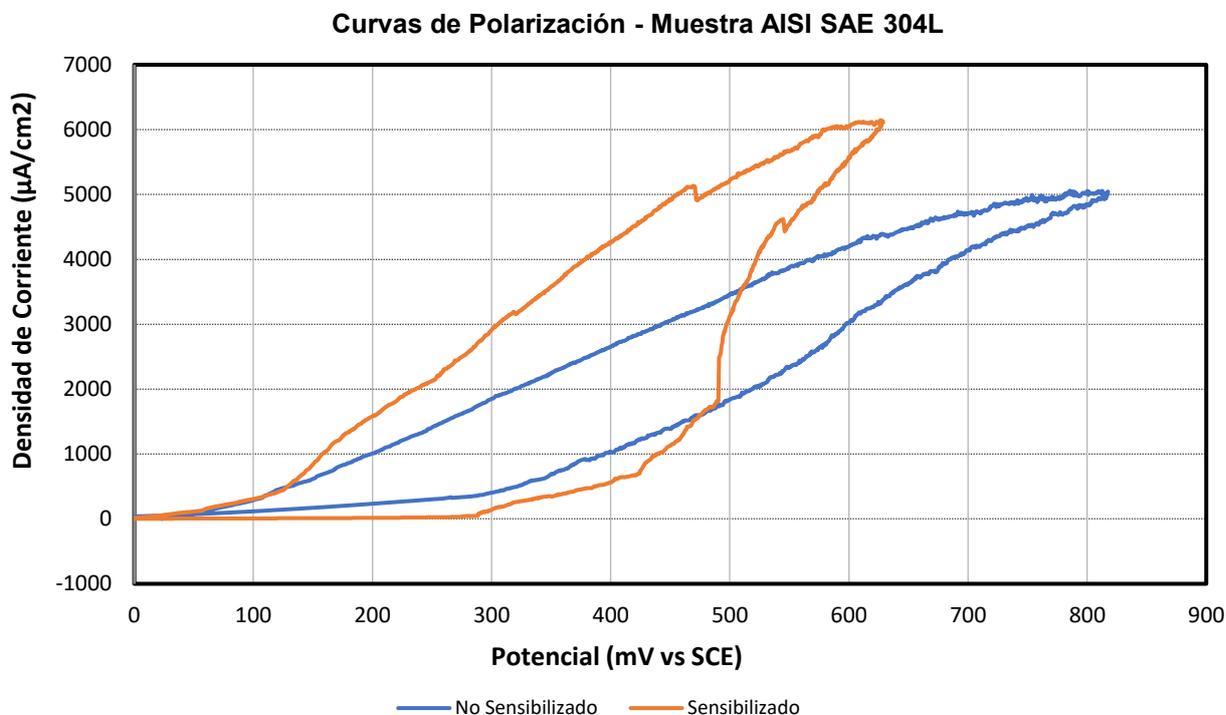


Figura 3.41 - Curvas de Polarización Anódica del AISI SAE 304 L sano y sensibilizado.

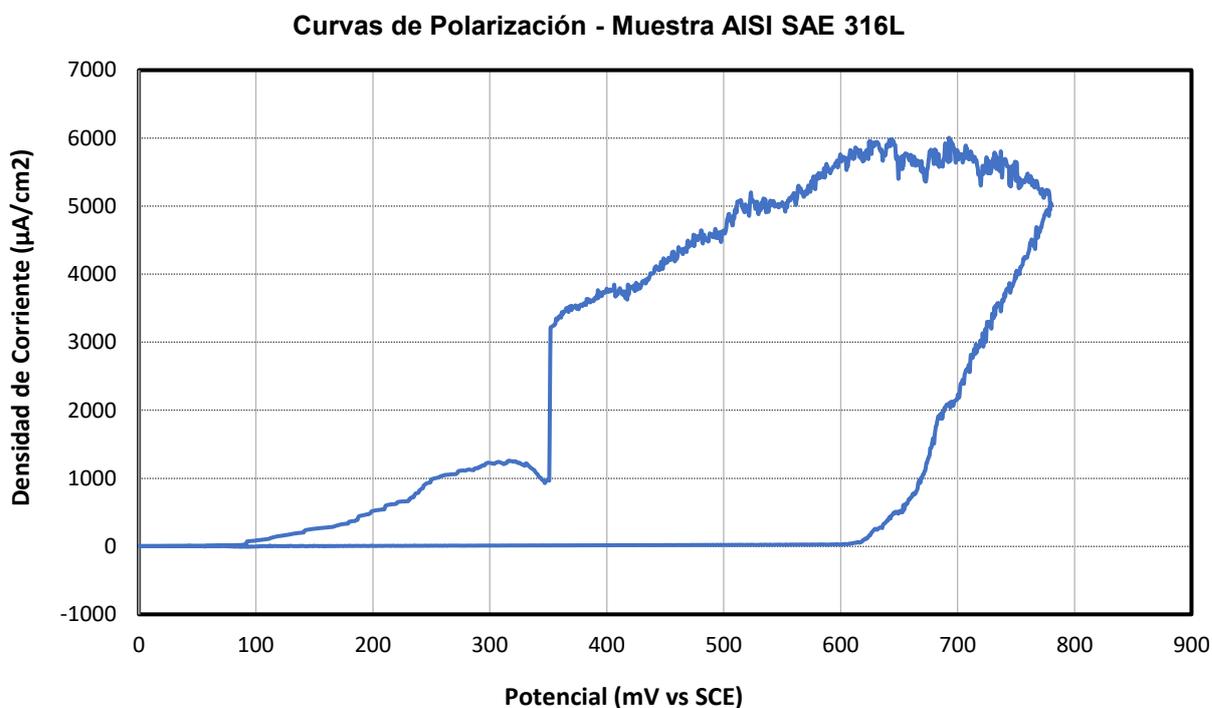


Figura 3.42 - Curvas de Polarización Anódica del AISI SAE 316 L.

Se observa en las figuras mostradas anteriormente, el comportamiento de las probetas en el medio del ácido carmínico, se realizan las siguientes observaciones:

De acuerdo con la figura 3.41, que corresponde a los resultados, se procede al análisis de las probetas del AISI SAE 304 L, tanto para el material sano y sensibilizado, el potencial del circuito abierto (OCP) corresponde a aproximadamente -100 mV SCE (medido con un electrodo de referencia Ag/AgCl). Adicionalmente para la gráfica naranja, correspondiente al material sensibilizado, se observa que tiene un potencial de picadura de aproximadamente 350 mV, donde la densidad de corriente comienza a aumentar rápidamente, en cambio para la gráfica azul, correspondiente al material sano, se observa un crecimiento progresivo de la densidad de corriente concluyendo que el material es susceptible a una corrosión por picaduras desde un inicio (con los parámetros que se emplearon en el presente estudio), ya que se observa que la capa pasiva del material empieza a deteriorarse, dado que la densidad de corriente tiende a aumentar.

De acuerdo con la figura 3.42, se procede al análisis de la probeta AISI SAE 316L, indicar que el presente estudio se ha limitado a estudiar solo una unión "sana" (sin sensibilizar), asimismo el potencial del circuito abierto (OCP) es de -80 mV aproximadamente. Para el análisis de la gráfica se puede observar que la probeta tiene un potencial de picadura de aproximadamente 640 mV.

Se observa que, de los 3 materiales ensayados, es el AISI SAE 304 L sensibilizado es el que posee una menor resistencia a la corrosión por picaduras, con un potencial menor, y que en el caso del material no sensibilizado este tiene un mejor comportamiento, aunque no presenta un potencial como tal, pero se observa que existe un deterioro de la capa pasiva en potenciales superiores de 300 mV. Se concluye que, si bien el material sano presenta mejor comportamiento, en ambas condiciones el material no es el adecuado para poder transportar la solución de ácido carmínico. Por otro lado, en el caso del AISI SAE 316L presenta un potencial de picaduras mayor, con un valor de casi el doble que los anteriores, concluyendo que este presenta la mejor resistencia de los 3 materiales en el estudio (este era el material original que se consideró para el diseño de la línea de transporte).

Es importante considerar que si bien el componente de estudio no presentó un mecanismo de falla correspondiente a corrosión por picaduras, este ensayo ayuda a

determinar la idoneidad del material para el transporte del ácido carmínico, además resaltar que si bien se definieron inicialmente los parámetros (temperatura, pH, concentración de la solución, entre otros) tratando de emular las condiciones de servicio, no se podrá replicar en su totalidad, dado que se desconocen ciertas condiciones (como posición del codo, velocidad del fluido, entre otros), posiblemente variando los valores de picaduras, sin embargo, tendrá un comportamiento similar (sensible a la corrosión por picaduras).

Es importante destacar también que las probetas, posterior al ensayo, fueron revisadas para verificar que no se dio una corrosión por resquicios, la cual puede darse afectando los resultados del ensayo.

Adicionalmente se muestran la metalografía de las probetas, en las figura 3.43, 3.44, 3.45 y 3.46, de las probetas ensayadas donde se verifican el mecanismo de corrosión por picaduras observadas en las gráficas anteriores.

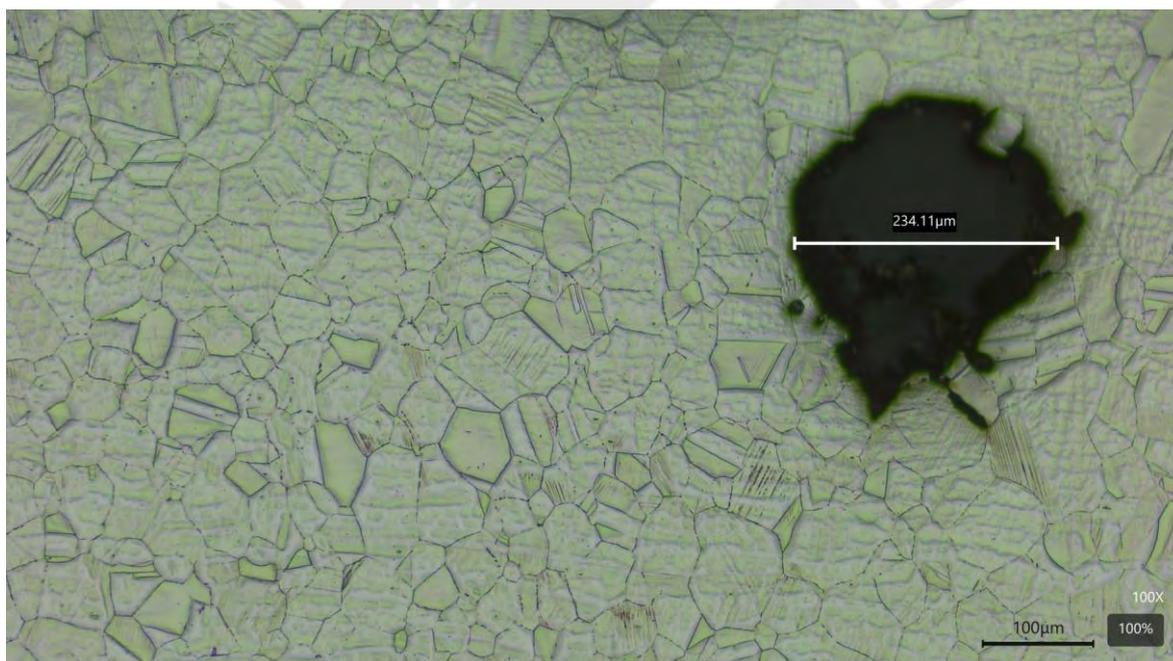


Figura 3.43 - Microestructura de la probeta de AISI SAE 316 L 100X – Reactivo: ácido oxálico

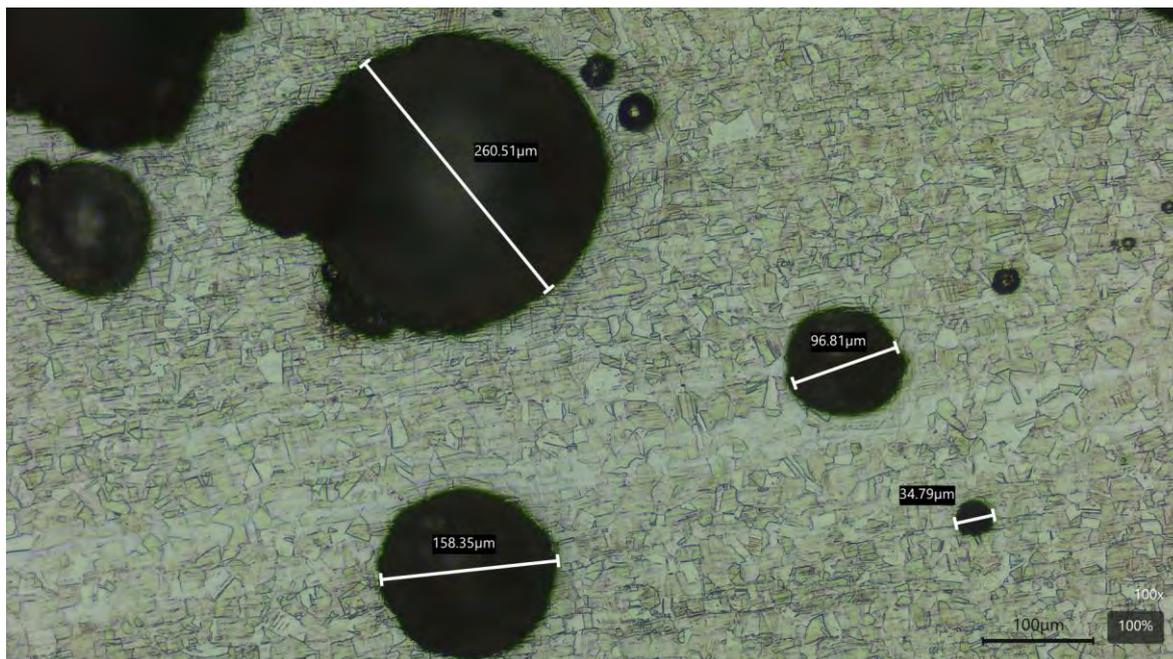


Figura 3.44 - Microestructura de la probeta de AISI SAE 304 L con 2 pases – 100X – Reactivo: ácido oxálico

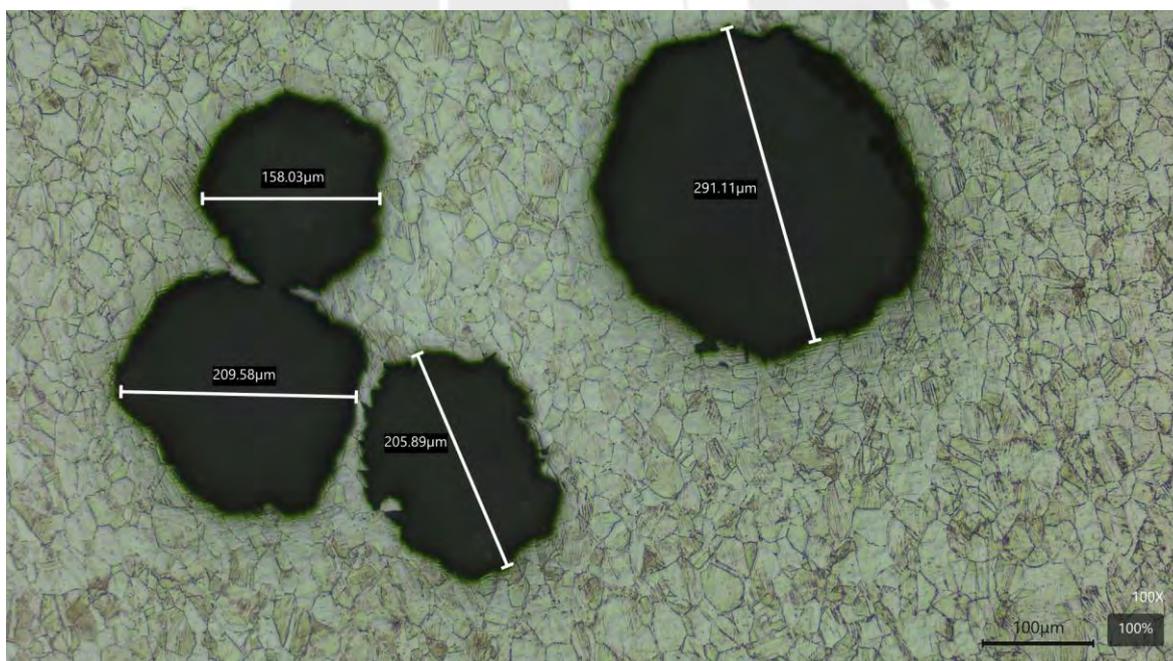


Figura 3.45 - Microestructura de la probeta de AISI SAE 304 L con 1 solo pase – 100X – Reactivo: ácido oxálico

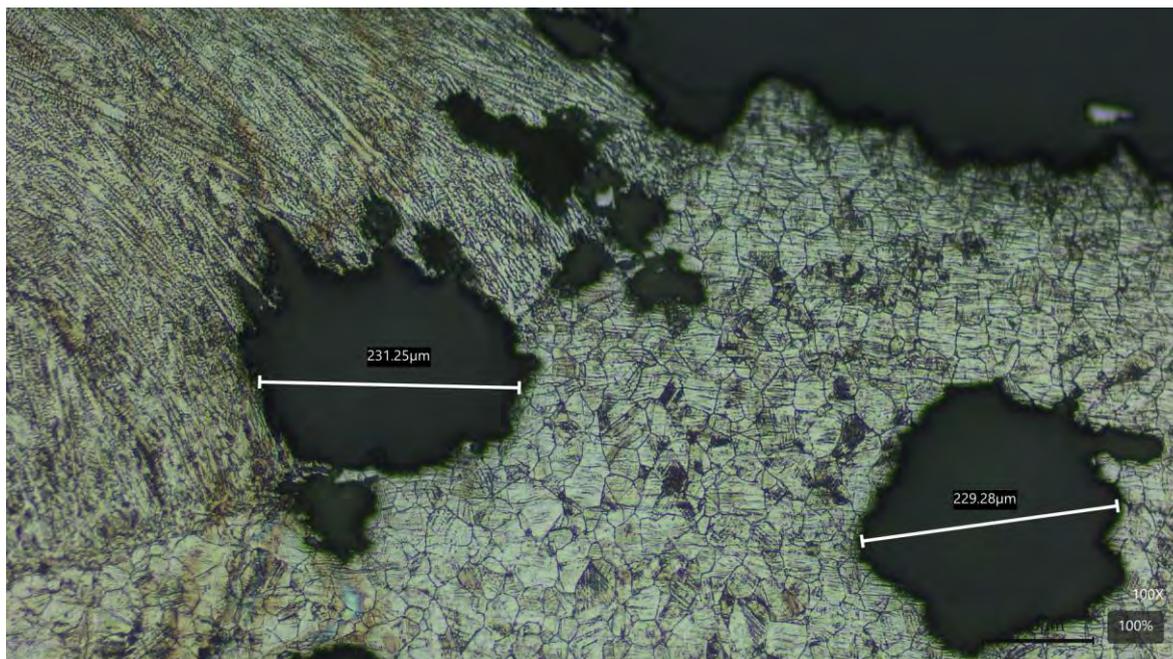


Figura 3.46 - Microestructura del SAE 304 L y cordón de soldadura con un solo pase 100X – reactivo: ácido carmínico

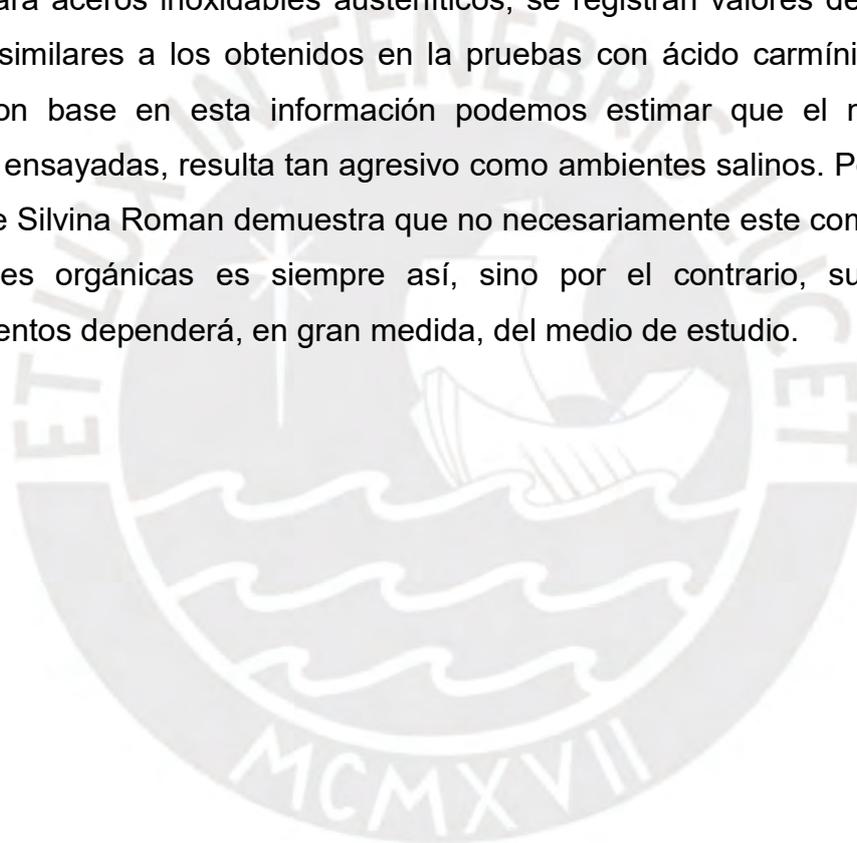
De las microestructuras mostradas se observa que las picaduras se dieron de manera indistinta en la matriz austenítico de las tres probetas, reforzando que en las condiciones dadas el material es susceptible a corrosión, además en la figura 3.46 se muestra que el mecanismo de corrosión se da tanto en el cordón como en el material base, concluyendo así que el material no es el adecuado en las condiciones planteadas en el ensayo mencionado anteriormente.

Se procede a indicar los siguientes 3 puntos acerca de los resultados obtenidos para dar una mejor idea de estos valores, el primero, se basa en un estudio donde se analiza el comportamiento electroquímico que tiene el AISI 304 en una solución de ácido clorhídrico [39] a temperatura ambiente mediante curvas de polarización anódica, y de este se obtienen valores de potencial de picaduras de aproximadamente 300 mV (vs SCE).

De igual manera, en un análisis de polarización cíclica correspondiente a 2 muestras de AISI SAE 316 L, en una solución de salmuera al 3% a temperatura ambiente, se determinó un valor de potencial de picaduras de aproximadamente 320 mV (vs SCE) [40].

Por otro lado, para realizar un contraste de los valores anteriores, se tomó en cuenta lo planteado por Silvina Roman [41], donde se realizó el estudio de la resistencia de corrosión del acero AISI 304 en biodiesel a base de soja, principalmente mediante un ensayo de polarización anódica, donde se llegó hasta valores de 2000 mV (vs SCE) y no se obtuvo un incremento brusco de valores de corriente concluyendo así que no este medio no es corrosivo para el material de estudio.

Los 3 puntos mencionados, anteriormente, sirven para dimensionar de manera más adecuada los valores obtenidos en el ensayo de polarización anódica del presente estudio, como se ha mencionado, para medios salinos, aquellos que son muy agresivos para aceros inoxidable austeníticos, se registran valores de 300 mV los cuales son similares a los obtenidos en la pruebas con ácido carmínico, un ácido orgánico, con base en esta información podemos estimar que el medio, a las condiciones ensayadas, resulta tan agresivo como ambientes salinos. Por otra parte, el estudio de Silvina Roman demuestra que no necesariamente este comportamiento en soluciones orgánicas es siempre así, sino por el contrario, sus efectos y comportamientos dependerá, en gran medida, del medio de estudio.



4. Conclusiones

- El material del accesorio (codo) es compatible con un acero AISI SAE 304 L, información que se contradice con la suministrada, la cual indicaba originalmente que se trataba de un AISI/SAE 316L.
- Respecto a la “corrosión circunferencial” se ha determinado que la falla se ha producido por un mecanismo de corrosión intergranular, concluyendo que esta se ha originado por un proceso inadecuado de soldadura, que generó un sobrecalentamiento excesivo y a su vez contribuyó con la formación de carburos a una distancia de 5.7 mm de la línea de fusión, asimismo debido a la geometría propia de este componente se pudo explicar el sentido de propagación, dado a su comportamiento térmico de este frente al proceso de soldadura.
- Respecto a la “corrosión longitudinal” se ha determinado que la falla se ha producido por un mecanismo de corrosión selectiva (debido, principalmente, a una inadecuada selección del material del codo) generada principalmente en la costura del accesorio la cual corresponde a la zona donde solo hay ferrita (microconstituyente), ya que como se mencionó anteriormente este posee menor resistencia contra la corrosión en comparación a la austenita, además se concluyó, a través del ensayo de polarización anódica, que este material (AISI SAE 304 L) llega a ser sensible ante la corrosión por picaduras en una solución de ácido carmínico, que si bien no ha sido el mecanismo principal de falla en esta sección, la inspección metalográfica permitió observar formación de picaduras en el material del accesorio, por lo que se concluye que la falla se dio por que el material no era el que correspondía.
- Resulta impreciso establecer el alcance en la responsabilidad de los controles de calidad de la empresa constructora de la línea de transporte del ácido carmínico, dado que la información suministrada para el presente estudio indica que solo ha sido en este accesorio donde se ha generado la falla, motivo por el cual se puede inferir que los demás accesorios y/o tuberías no presentaron algún tipo de corrosión, e inferir que el material de estos fue el adecuado y que el proceso de soldadura también.

5. Recomendaciones

- Para el presente estudio se tuvo cierta dificultad para poder encontrar accesorios del material AISI SAE 304 L, dado que los que se emplearon inicialmente correspondían a un material AISI SAE 304 o incluso eran material que ya se encontraba sensibilizado, se estima que esto ocurre en nuestro país debido que no existe un control adecuado, por parte del estado, sobre el ingreso de estos componentes, como bien se ha indicado en el presente estudio, la falla en el componente también se produce porque este no corresponde al esperado, es importante mencionar que durante la realización del presente estudio se pudo detectar adicionalmente que en otros proyectos similares se encontró que la falla más recurrente se daba en los accesorios y no en líneas de tuberías.
- Se recomienda mejorar los procesos de supervisión en el tema de las uniones soldadas, dado que, si bien el material no fue el correspondiente, aun así, se ha generado un problema de corrosión intergranular, esto debido a un excesivo calentamiento, explicando así la formación de carburos y perdiendo la protección contra la corrosión propia de estos materiales.

6. Referencias Bibliográficas

[1] ROSELL GONZALES, JUAN VICENTE

2016 “Aceros Inoxidables y Resistentes al Calor”. Material Curso de formación de Ingenieros Internacionales de Soldadura– IWE. Ciudad: Madrid: Asociación Española de Soldadura y Tecnología de Unión.

[2] REINA GOMEZ, MANUEL

2003 Soldadura de los Aceros y Aplicaciones. Madrid: Weld Work.

[3] STRUERS

Struers: Preparación Metalográfica de Aceros Inoxidables. Consulta: Febrero del 2024.

<https://www.struers.com/es-ES/Knowledge/Materials/Stainless-Steel#>

[4] AMERICAN WELDING SOCIETY

2020 AWS A3.0: Definiciones y términos estándar de las soldaduras. Florida.

[5] SANZ CUBERO, JOSÉ ANTONIO

2016 “Soldeo TIG”. Material Curso de formación de Ingenieros Internacionales de Soldadura– IWE. Madrid: Asociación Española de Soldadura y Tecnología de Unión.

[6] HERNANDEZ RIESCO, GERMÁN

2016 Manual de Soldadura. Madrid: Coboprint.

[7] FOSCA PASTOR, CARLOS ABRAHAM

2021 “Mecanismos de Daño Vinculados a la Corrosión”. Material de la Diplomatura de Estudio de Análisis de Falla en Componentes Mecánico. Ciudad: Lima. Unidad de Ingeniería de Soldadura – Facultad de Ciencias e Ingeniería. PUCP.

[8] FORERO MORA, ALVARO

1984 Corrosión Intergranular de los Aceros Inoxidables. Número 2. “Ingeniería e Investigación” pp. 20 -24.

[9] ASM International

2004 Metals Handbook Volume 13 - CORROSION.

[10] GONZAGA ET AL

2020 Influence of post welding heat treatments on sensitization of AISI 347 stainless Steel welded joints. Journal of Materials Research and Technology. Vol 9: 908 – 921. 2020.

[11] FOSCAR PASTOR, CARLOS ABRAHAM.

2021 Fundamentos de la corrosión para ingenieros. Lima: PUCP.

[12] ASTM INTERNATIONAL

2021 ASTM G5: Standard Reference Test Method for Making Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements.

[13] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION

2006 ISO 12732: Corrosion of metals and alloys — Electrochemical potentiokinetic reactivation measurement using the double loop method (based on Čihal's method).

[14] TEMÍSTOCLES DE SOUSA, LUZ

2002 Influencia das variaveis e do proceso de soldagem na sesitizao dos acos inoxidáveis austeníticos por acos inoxidáveis austenítico. Tesis de Magister en Ingeniería y Ciencia de los Materiales. Fortaleza: Universidad Federal De Ceará: CENTRO TECNOLÓGICO DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA Y PRODUCCIÓN

[16] LLEMPEN AURAZO, LUZ CRISTINA

2018 Extracción del ácido carmínico mediante dos métodos, a partir de la cochinilla (*Dactylopius Coccus*), aplicado en textilería. Tesis para optar al Título de Ingeniero Química. Lambayeque: Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo: Facultad de Ingeniería Química E Industrias Alimentarias.

[15] AYALA VALENCIA, GERMAN

2023 Natural Additives in Foods. Federal University of Santa Catarina. Brazil.

[17] VAZQUEZ ET AL

2017 Diseño de una Planta Industrial para la Obtención de ácido carmínico. Revista Iberoamericana de Ciencias. Vol 4.

[18] Cooperación Alemana al Desarrollo – GIZ

2013 CATALOGO DE MAQUINARIA PARA PROCESAMIENTO DE COCHINILLA. Consulta: Febrero 2024.

[19] MINISTERIO DE DESARROLLO AGRARIO Y RIEGO

2022 Perfil de Mercado de la Cochinilla 2017 – 2021. Lima.

[20] ASOCIACIÓN DE EXPORTADORES – PERÚ

2023 Colorantes Naturales: Evolución del Mercado Mundial y Nacional. Junio 2023. Lima

[21] INTERNATIONAL DEVELOPMENT RESEARCH CENTRE

1998 Carmine Dye Extraction Process and the Cochineal Insect. Ottawa.

[22] LIU ET AL

2017 An Advanced Spectroscopy Lab That Integrates Art, Commerce, and Science as Students Determine the Electronic Structure of the Common Pigment Carminic Acid. Journal of Chemical Education Vol. 94: 216-220. 2017

[23] SANDVIK STEELS

1999 Corrosion Handbook for Stainless Steel. Consulta: Febrero 2024.

[24] ASM INTERNACIONAL

2004 Metals Handbook Volume 11 - Failure Analysis and Prevention.

[25] MERINO PONCE, DANIEL

2020 ANÁLISIS DE FALLA DE UN ÁRBOL DE LEVAS DE BOMBA DE INYECCIÓN DE COMBUSTIBLE REPARADO POR SOLDADURA. Trabajo para optar al título de Magíster en Ingeniería de Soldadura. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú. Escuela de Posgrado.

[26] SAKIHAMA UEHARA, JOSE LUIS

2021 “Metodología para el Desarrollo de un análisis de Falla”. Material de la Diplomatura de Estudio de Análisis de Falla en Componentes Mecánico. Ciudad: Lima. Unidad de Ingeniería de Soldadura – Facultad de Ciencias e Ingeniería. PUCP.

[27] RAHIMI S., ENGELBERG D.

2010 “Characterisation of the Sensitisation Behaviour of Thermomechanically Processed Type 304 Stainless Steel Using DL-EPR Testing and Image Analysis Methods.

[28] AMERICAN SOCIETY MECHANICAL ENGINEERS

2019 ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Sec. V, Artículo 9 – Visual Examination

[29] ASTM INTERNATIONAL

2021 ASTM E415: Standard Test Methods Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry.

[30] ASTM INTERNATIONAL

2011 ASTM E3-11: Standard Test Methods for Preparation of Metallographic Specimens.

[31] ASTM INTERNATIONAL

2007 ASTM E407-07: Microetching Metals and Alloys.

[32] PANMONGKOL PICHA

2020 Effect of backing gas mixtures on corrosion properties of stainless steel grade 304 weld metal by autogenous GTAW. Journal of Material Research and Technology 2021; 11: 1559-1570.

[33] ASM International

2004 Metals Handbook Volume 9 - Metallography and Microstructures.

[34] TERAN ET AL

2004 Estudio de la corrosion producida en aceros inoxidables 304 en procesos de soldadura. DYNA Vol. 71: 61-66. 2004

[35] ASTM INTERNATIONAL

2019 ASTM A270: Standard Specification for Seamless and Welded Austenitic and Ferritic/Austenitic Stainless Steel Sanitary Tubing.

[36] GUANGJIE FENG

2022 New Numerical model to predict welding-induced sensitization in SUS304 austenitic stainless-Steel joint. Journal of Materials Research and Technology. 2022; 17:234-243.

[37] LIU ET AL

2021 Application of Double Loop Electrochemical Potentio-kinetic Reactivation for characterizing the intergranular corrosion susceptibility of stainless steels and Ni-based alloys in solar nitrate salts used in CSP. Journal of Engineering Failure Analysis Vol. 129. 2021.

[38] LIU ET AL

2016 Parametric optimization of DL-EPR technique for evaluating IGC susceptibility of 316LN type stainless steel using the Taguchi method. Journal of Materials and Corrosion Vol. 67:271-276. 2016.

[39] TRISTANCHO REYES

2019 Evaluación Electroquímica de los aceros inoxidable AISI SAE 430 y AISI SAE 304 en ambientes altamente corrosivo. Tesis para optar el título de Ingeniero mecánico. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ingeniería Mecánica.

[40] OLIVA CONDE

2021 Estudio Comparativo sobre la resistencia a la corrosión en aceros inoxidable utilizados en intercambiadores de calor. Tesis para optar al título de Ingeniero Mecánico. Lima: Universidad de Ingeniería y Tecnología: Facultad de Ingeniería Mecánica.

[41] SILVINA ROMAN

2016 Resistencia a la corrosión del acero inoxidable AISI 304 L en biodiesel en soja. ANALES AFA Vol. 27 N.1 (14-18). 2016.