

Modificación Superficial de Aleaciones Metálicas Obtenidas por Fabricación Aditiva

Nasarallah Nassar Gualteros Jiménez

Trabajo de Grado para optar al Título de Ingeniera Metalúrgica

Directora

PhD. Sandra Judith García Vergara

Codirectora

PhD. María Angeles Arenas Vara

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales

Bucaramanga

2026

DEDICATORIA

Quiero agradecer primeramente a Dios, por todas las bendiciones recibidas durante estos años de universidad.

Dedico esta tesis a mi nona, Virginia Quiñonez (Q. E. P. D.), mi viejita linda. Hoy no estás presente para seguir acompañando mis pasos, pero llevo en el corazón aquellos días en los que, cuando la vida me pesaba, lograbas hacerla más ligera con un plato de comida caliente y palabras de amor. Gracias por todo lo que me diste, fue y siempre será un honor ser tu nieta.

A mi familia: mis papás, mis hermanos y mi tío, quienes siempre me apoyaron con confianza, amor y motivación para seguir adelante. A mi papá, que ha sufrido mis tropiezos tanto como yo y ha celebrado mis logros como si fueran suyos: gracias por brindarme todas las herramientas para alcanzar mis sueños e impulsarme a luchar por ellos.

A mi compañera de aventura, Nayara, gracias por invitarme a ser parte de una experiencia inolvidable. Aunque las palabras no alcancen para describirla, aquellos días en Madrid quedarán grabados para siempre en nuestra memoria y en nuestro corazón.

A mi pareja, Manuel, que con paciencia y amor me recordaba constantemente que “*yo podía*”, incluso en mis días de frustración y estrés. Gracias por ser mi impulso, mi refugio y mi fuerza para culminar este proyecto.

A mis amigos más cercanos: Sebas, Karen, Bayonis y Andrés, gracias acompañarme en mis días más oscuros, por alegrar cada momento y por ser un gran apoyo. Por último, y no menos importante, a mí misma, por no rendirme a pesar del cansancio y los obstáculos. Por cada desvelo, cada lágrima y cada intento de seguir adelante cuando parecía imposible. Este trabajo es también un recordatorio de mi propia capacidad y resiliencia.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander por su apoyo integral a lo largo de mi carrera: por brindarme oportunidades de crecimiento, bienestar y una formación académica de calidad.

A mis profesores de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica, quienes con paciencia, dedicación y vocación dejaron una huella en mi formación académica y personal.

A mis guías del CENIM, Geles, Juan, Ana, Mar e Iñaqui, por su generosa orientación, paciencia y por brindarme aprendizajes que enriquecieron profundamente mi desarrollo académico. A Geles, por la paciencia infinita al explicarme siempre de la forma más simple para que pudiera comprender y por compartir conmigo una parte de tu conocimiento; a Juan, por mostrarme el gran corazón que tienes y hacer cada momento más divertido; a Mar, por cuidarnos en los laboratorios y mostrarnos nuevos lugares por descubrir; a Ana, por auxiliarnos cada vez que cometíamos desastres, e Iñaqui, por hacer más amenas las comidas con sus comentarios ocurrentes. Gracias a todos ustedes por hacer de nuestro paso por el CENIM no solo una experiencia de aprendizaje, sino también de cariño y amistad.

A la profesora Sandra, gracias por acompañarme y ayudarme a cumplir este sueño tan importante en mi aprendizaje. Disfruté cada momento de la realización de esta tesis y, sin duda, valió la pena cada esfuerzo aquí dedicado.

Tabla de Contenido

1	INTRODUCCIÓN	13
2	Objetivos	14
2.1	Objetivo General	14
2.2	Objetivos Específicos.....	14
3	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	15
3.1	Procesos de fabricación aditiva.....	16
3.2	Sinterizado láser en cama de polvo (SLM).....	17
3.3	Anodizado	17
3.4	Técnicas Electroquímicas para el estudio de la Corrosión	18
3.4.1	Curvas de polarización potenciodinámicas	19
3.4.2	Pasivación	19
3.4.3	Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS)	20
4	DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL	20
4.1	Materiales.....	20
4.2	Preparación Superficial.....	23
4.3	Preparación Metalográfica	23
4.3.1	Pulido.....	23
4.3.2	Ataque.....	24
4.4	Microscopia óptica.....	24

4.5	Montaje de las muestras	24
4.6	Anodizado	25
4.7	Mojabilidad Superficial	25
4.8	Rugosidad	26
4.9	Ensayos electroquímicos.....	26
4.9.1	Curvas de polarización potenciodinámicas	26
4.9.2	Espectroscopia de Impedancia Electroquímica	27
5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27
5.1	Caracterización metalográfica	27
5.2	Anodizado	30
5.3	Caracterización de las capas anódicas	31
5.3.1	Rugosidad y mojabilidad superficial	31
5.3.2	Espesor capa anódica.....	32
5.3.3	Microscopía electrónica de Barrido (SEM).....	33
5.4	Ensayos electroquímicos.....	35
5.4.1	Curvas de polarización	35
5.4.2	Espectroscopía electroquímica de impedancia (EIS)	45
6	CONCLUSIONES	52
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53
	APÉNDICES.....	56

Lista de Tablas

Tabla 1. Tecnologías de impresión 3D, acrónimo y años de desarrollo.....	16
Tabla 2. Composición química de las aleaciones empleadas en este trabajo.....	21
Tabla 3. Denominación e identificación de las muestras utilizadas en el proyecto.	22
Tabla 4. Variables de partida en el proceso de anodizado.....	25
Tabla 5. Parámetros utilizados en la prueba de mojabilidad.....	26
Tabla 6. Condiciones experimentales empleadas las curvas de polarización	26
Tabla 7. Condiciones experimentales utilizadas en los ensayos de EIS.	27
Tabla 8. Resultados obtenidos de las curvas de polarización	42
Tabla 9. Velocidad de corrosión de las muestras estudiadas.....	43
Tabla 10. Resistencia a la corrosión en función de V_{corr}	44

Lista de Figuras

Figura 1. Esquema de impresión 3D por SLA.....	15
Figura 2. Esquema de la vista transversal (parte izquierda) y la vista superior (parte derecha) del crecimiento de las celdas AAP tras el proceso de anodizado.....	18
Figura 3. Bosquejo de las muestras de la Aleación A356, identificada a lo largo del trabajo como REF.....	21
Figura 4. Bosquejo de las muestras de Fabricación Aditiva de acuerdo con sus características.....	22
Figura 5. Figura del montaje realizado para cada muestra durante los ensayos electroquímicos.....	24
Figura 6. Micrografía óptica aleación A356 con ataque químico (HF 0,05% + H ₂ O) a 100X.....	28
Figura 7. Micrografía óptica de sección transversal aleación AlSi10Mg con ataque químico (HF 0,05% + H ₂ O) a 100X.....	29
Figura 8. Micrografía óptica de sección transversal aleación AlSi10Mg con ataque químico (HF 0,05% + H ₂ O) a 500X.....	29
Figura 9. Micrografía óptica de sección longitudinal aleación AlSi10Mg con ataque químico (HF 0,05% + H ₂ O) a 100X.....	29
Figura 10. Micrografía óptica de sección longitudinal aleación AlSi10Mg con ataque químico (HF 0,05% + H ₂ O) a 50X.....	29
Figura 11. Acabado de la muestra de REF tras el proceso de anodizado	31
Figura 12. Acabado de las muestras de FA tras el proceso de anodizado.	31
Figura 13 . Espesor de las capas anódicas de las muestras de estudio.....	33

Figura 14. Micrografía SEM de la muestra FA-B anodizada en H ₂ SO ₄	34
Figura 15. Micrografía SEM de la muestra FA-B anodizada en H ₂ SO ₄	34
Figura 16. Micrografía SEM de la muestra HT-B anodizada en H ₂ SO ₄	34
Figura 17. Micrografía SEM de la muestra HT-B anodizada en H ₂ SO ₄	34
Figura 18 . Ejemplo de curvas de polarización con el método de extrapolación de Tafel.	35
Figura 19. Curva de polarización de la muestra de REF antes del anodizado en NaCl 0.6M.	37
Figura 20. Curva de polarización FA-C con ajuste de Tafel.	39
Figura 21. Curvas de polarización cíclicas de las muestras REF, FA (A, B, C) y HT (A, B) en estado inicial.....	40
Figura 22. Curvas de polarización cíclica de las muestras REF, FA (A, B, C) y HT (A, B) anodizadas en H ₂ SO ₄ 0,4 M a 35 °C.....	41
Figura 23. REF sin anodizar tras curvas de polarización.....	45
Figura 24. REF anodizado tras curvas de polarización.....	45
Figura 25. FA sin anodizar tras curvas de polarización	45
Figura 26. FA anodizada tras curvas de polarización.....	45
Figura 27. Evolución de los diagramas de EIS en la muestra REF en NaCl 0,6M a los 30 días de inmersión.	46
Figura 28. Evolución de EIS en la muestra REF anodizado en H ₂ SO ₄ en NaCl 0,6M a los 30 días de inmersión.	47
Figura 29. Evolución de los diagramas de EIS en la muestra FA en NaCl 0,6M los 30 días de inmersión.....	47

Figura 30. Evolución de EIS en la muestra FA anodizado en H_2SO_4 en NaCl 0,6M a los 30 días de inmersión.	48
Figura 31. Circuito equivalente para las muestras de REF y FA a las 4 horas de inmersión en NaCl 0,6M.....	48
Figura 32. Diagramas de EIS experimentales y simulados para la muestra REF durante 4 horas de inmersión en NaCl 0,6M.	49
Figura 33. EIS experimental y simulado de FA anodizada en H_2SO_4 tras 22 días de inmersión en NaCl 0,6M.....	50
Figura 34. Gráfico Rct Vs. Tiempo comparativo de las muestras REF y FA antes y después del proceso anodizado.....	51

Lista de Apéndices

Apéndice A. Parámetros de deposición del proceso de fabricación aditiva SLM.....	56
Apéndice B. Curvas de rama de anodizado y criterio de aceptación.....	57
Apéndice C. Datos complementarios de rugosidad y mojabilidad de las muestras REF y FA antes y después del anodizado.....	59
Apéndice D. Cálculos utilizados para obtener la velocidad de corrosión	66
Apéndice E. Circuitos equivalentes utilizados en la simulación de impedancias.....	67
Apéndice F. Tablas completas de parámetros electroquímicos.....	70

Resumen

Título: Modificación superficial de aleaciones metálicas obtenidas por fabricación aditiva

Autor: Nasarallah Nassar Gualteros Jiménez

Palabras clave: Anodizado, fabricación aditiva, modificación superficial.

Descripción: La fabricación aditiva, especialmente la técnica de fusión por láser y sinterización directa de metal por láser (DMLS), ha ganado prominencia en menos de tres décadas. Esta metodología, implica la superposición de capas de material para construir objetos tridimensionales, en contraste con los métodos tradicionales de fabricación sustractiva. El objetivo es transformar modelos iniciales de CAD en objetos finales con todas las propiedades estructurales y funcionales requeridas. A pesar de su incipiente desarrollo, existe una extensa literatura sobre el uso de la técnica de DMLS para procesar diversos materiales metálicos, desde nuevas aleaciones ligeras hasta aceros inoxidable, aleaciones de titanio y CoCrMo. En este contexto, este trabajo de investigación se enfoca en la preparación y caracterización de aleaciones de aluminio, específicamente aleaciones de AlSiMg, utilizando la técnica de DMLS. Se realizará un análisis de la microestructura y la resistencia a la corrosión, junto con la evaluación de una modificación superficial en la aleación. Teniendo como referencia una aleación de aluminio comercial, obtenida bajo el procedimiento tradicional de fundición, cuya composición química es similar a las muestras fabricadas.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director: Sandra Judith Vergara Garcías. PhD en corrosión. Codirector: María Angeles Arenas Vera. PhD. en Materiales.

Abstract**Title:** Surface Modification of Metal Alloys Obtained by Additive Manufacturing**Author:** Nasarallah Nassar Gualteros Jiménez**Keywords:** Anodizing, additive manufacturing, surface modification

Description: Additive manufacturing, especially the technique of laser melting and direct metal laser sintering (DMLS), has gained prominence in less than three decades. This methodology involves the layering of material to build three-dimensional objects, in contrast to traditional subtractive manufacturing methods. The objective is to transform initial CAD models into final objects with all the required structural and functional properties. Despite its relatively recent development, there is extensive literature on the use of the DMLS technique for processing various metallic materials, ranging from new lightweight alloys to stainless steels, titanium alloys, and CoCrMo. In this context, the present research focuses on the preparation and characterization of aluminum alloys, specifically AlSiMg alloys, using the DMLS technique. An analysis of the microstructure and corrosion resistance will be conducted, along with the evaluation of a surface modification in the alloy. A commercial aluminum alloy, produced by the traditional casting process and with a chemical composition like the fabricated samples, will be used as a reference.

* Degree Work

**Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science.
Thesis Director: Sandra Judith Vergara García, Ph.D. in Corrosion.
Co-Director: María Ángeles Arenas Vera, Ph.D. in Materials Science.

1 INTRODUCCIÓN

Entre las nuevas técnicas de procesado de materiales, las técnicas de fabricación aditiva se han puesto a la cabeza en menos de tres décadas y más especialmente desde 2007. Las técnicas de fabricación aditiva por láser, en general conocidas como “Laser Additive Manufacturing”, reciben diversos nombres en función del campo de aplicación específica de la técnica y de la empresa desarrolladora de la tecnología concreta. En el caso de la fabricación de piezas metálicas, se suele emplear el término fusión por láser o la sinterización directa de metal por láser - “Direct Metal Laser Sintering”- (DMLS). La American Society for Testing and Materials, define esta técnica como el proceso de unir materiales, normalmente capa a capa, para fabricar objetos tridimensionales. Se trata, por tanto, de un procedimiento diferente a los procesos de manufactura tradicionales basados en tecnologías de fabricación sustractiva. Este proceso aditivo busca, en definitiva, pasar de un modelo inicial desarrollado por CAD (Computer Aided Design) a un objeto final con todas las propiedades funcionales y estructurales operativas. (Bourell & Beamon, 2012)

A pesar de su reciente desarrollo, existe abundante bibliografía sobre el uso de la técnica de DMLS para procesar diferentes materiales metálicos que abarcan desde nuevas aleaciones ligeras hasta aceros inoxidable, aleaciones de titanio o aleaciones de CoCrMo. (Mukesh, David, Joseph , Harris Marcus, & Joel Barlow, 2015)

En el presente trabajo de investigación se prepararon aleaciones AlSi10Mg mediante la técnica de manufactura aditiva DMLS, con el objetivo de estudiar cómo la microestructura y los tratamientos térmicos influyen en su resistencia a la corrosión. Además, se evaluó el efecto del anodizado como tratamiento de modificación superficial, permitiendo establecer la relación entre la morfología, la rugosidad y la mojabilidad con el desempeño electroquímico de las muestras.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Caracterizar una aleación de aluminio-silicio-magnesio obtenida mediante fusión selectiva por láser en cama de polvo (SLM) y compararla con la aleación comercial de aluminio A356.

2.2 Objetivos Específicos

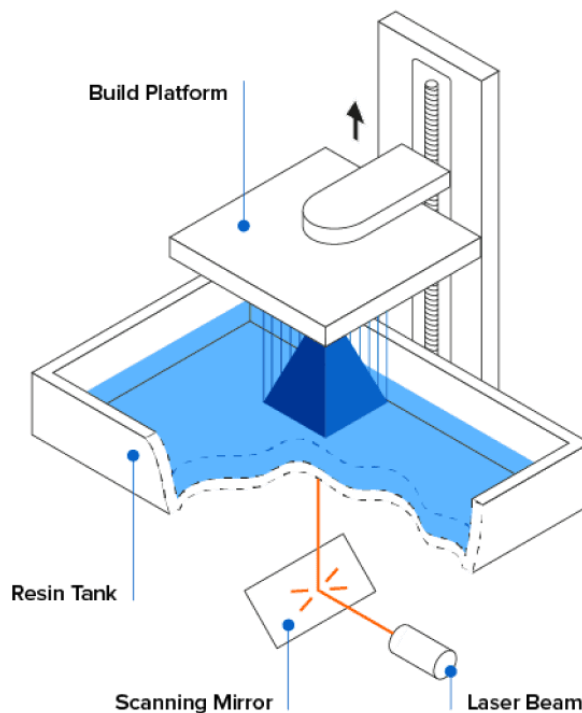
- Realizar la caracterización microestructural y composicional de las aleaciones.
- Modificar superficialmente las aleaciones obtenidas por fabricación aditiva mediante anodizado.
- Caracterizar electroquímicamente las aleaciones en un medio agresivo de cloruro sódico.

3 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

La tecnología de la impresión ha revolucionado el mundo desde hace más de 30 años hasta la fecha, comenzando en 1986 cuando Charles Hull patenta el proceso de impresión denominado estereolitografía o Stereo Litography Apparatus (SLA). Este proceso consiste en la obtención de objetos sólidos a partir del material en forma líquida con ayuda de un láser de luz ultravioleta, el cual logra solidificar a través de la polimerización capa a capa hasta crear el sólido diseñado previamente en un modelo 3D en un programa CAD, Figura 1. (Lipson & Kurman, 2013)

Figura 1.

Esquema de impresión 3D por SLA.



Nota: Tomado de (*formlabs, s.f.*)

Posteriormente, han surgido nuevos métodos de impresión 3D, como se recoge en la Tabla 1, algunos han desaparecido en el tiempo y otros siguen vigentes en la actualidad, y son objeto de estudio e incluso están implantados a nivel industrial.

Tabla 1.

Tecnologías de impresión 3D, acrónimo y años de desarrollo.

Nombre	Acrónimo	Año de desarrollo
Estereolitografía	SLA	1986-1988
Curado sólido a tierra	SGC	1996-1998, 1999 †
Fabricación de objetos laminados	LOM	1985-1991
Modelado por deposición fundida	FDM	1988-1991
Sinterizado por láser selectivo	SLS	1987-1992
Impresión 3D (goteo en cama)	3DP	1985-1997

Nota: Tomado de (Cirp.net, s.f.)

3.1 Procesos de fabricación aditiva

La impresión 3D, también denominada fabricación aditiva, se define como un conjunto de procesos que permiten crear objetos tridimensionales mediante la deposición controlada y sucesiva de material en capas, cada una de las cuales corresponde a una sección transversal de un modelo digital original. Las aleaciones metálicas y algunos plásticos son los materiales más utilizados para la impresión 3D, pero este proceso puede emplearse prácticamente con cualquier tipo de material, desde hormigón hasta tejidos vivos. (Autodesk, s.f.)

La fabricación aditiva ha traído consigo múltiples ventajas en el desarrollo de productos industriales puesto que permite la creación de prototipos y a su vez la modificación de estos en un tiempo y costo menor, optimizado así los diferentes procesos de fabricación.

Cada proceso de fabricación aditiva tiene sus aplicaciones, precios, ventajas e inconvenientes. La elección del proceso va a depender del valor añadido de la pieza a fabricar y del público al que va dirigido. Como se ha mencionado anteriormente, la tecnología SLA es una de las más utilizadas. Sin embargo, en el caso de las aleaciones metálicas, se emplean

fundamentalmente el **sinterizado láser en cama de polvo (SLM)**. (Olakanmi, Cochrane, & Dalgarno, 2015)

3.2 Sinterizado láser en cama de polvo (SLM)

Esta técnica emplea como material de aporte polvos metálicos esféricos y de granulometría y composición controlada. La pieza se construye capa a capa. Los polvos metálicos se depositan en forma de capa fina en la plataforma de construcción, se funden mediante la pasada del haz láser y solidifican. A continuación, se pone otra capa y vuelve a pasar el haz láser, repitiéndose el proceso hasta finalizar la construcción de la pieza metálica.

La técnica de SLM se ha utilizado para la fabricación de diferentes materiales metálicos desde aleaciones base hierro (aceros inoxidable), aleaciones de titanio, superaleaciones de base Ni y aleaciones de aluminio.

3.3 Anodizado

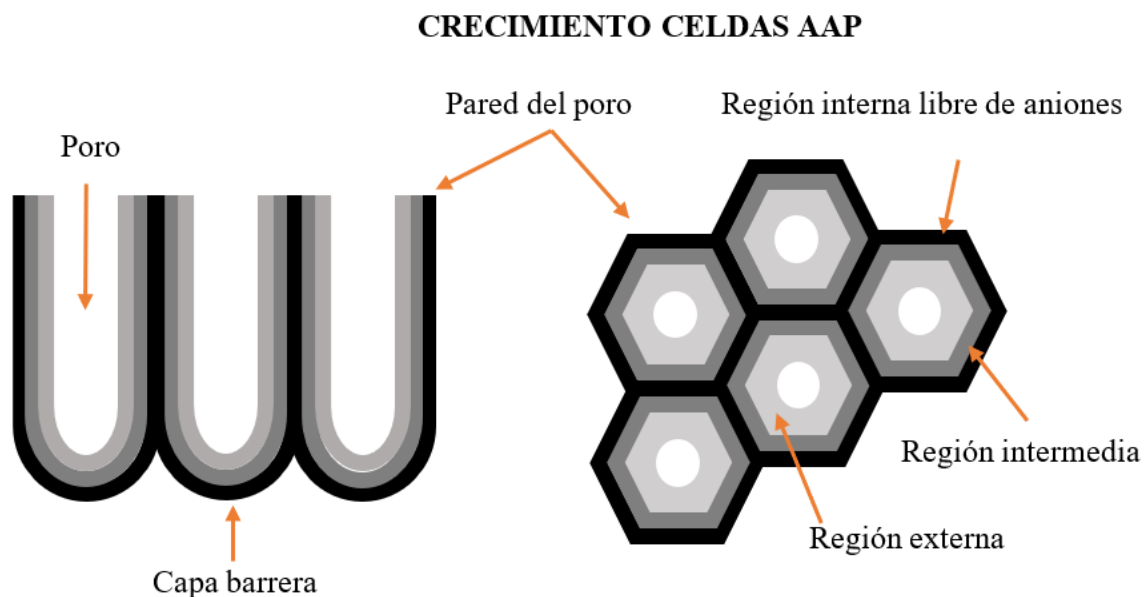
El anodizado es un proceso electroquímico que consiste en generar una capa de óxido de manera controlada sobre la superficie de un material metálico, bajo unas condiciones de corriente o de potencial en un medio adecuado. Este proceso, se lleva a cabo en una celda de dos electrodos donde el metal actúa como el ánodo y para el cátodo, se emplea un cátodo inerte (habitualmente platino), permitiendo obtener el crecimiento de la película de óxido que proporciona propiedades protectoras para el metal.

En el caso de aleaciones de aluminio anodizadas en medio ácido, se forma una capa barrera compacta en la interfase metal/óxido y una capa porosa de alúmina amorfa (Al_2O_3) en la superficie. El crecimiento de esta capa se debe a la disolución de la alúmina en la base del poro, impulsada por un campo eléctrico, que facilita el transporte de iones Al^{3+} y O^{2-} a través de la capa

barrera. Las celdas hexagonales que conforma la estructura se denominan celdas APP (aluminio anódico poroso), cuyo diámetro de poro y espesor de la capa barrera dependen del voltaje de anodizado y de los parámetros electroquímicos que optimicen la adhesión del recubrimiento, ver Figura 2. (García Vergara, Skeldon, Thompson, & Habakaki, 2007)

Figura 2.

Esquema de la vista transversal (parte izquierda) y la visa superior (parte derecha) del crecimiento de las celdas AAP tras el proceso de anodizado.



Nota: Elaboración propia, adaptado de (Campuzano & Mata Zamora, 2021)

3.4 Técnicas Electroquímicas para el estudio de la Corrosión

El uso de los métodos electroquímicos facilita el estudio de los fenómenos de corrosión en la interfase metal/electrolito en un sistema determinado. Estas técnicas están basadas en la ley de Faraday, que establece una relación entre la densidad de corriente y la velocidad de corrosión durante un proceso electroquímico. Igualmente, estos métodos se encuentran relacionados con dos variables fundamentales: potencial y corriente.

Estas variables permiten el acceso a otro tipo de información en el análisis electroquímico. La modificación controlada de cualquiera de las dos variables va a generar perturbaciones el sistema, lo que permite observar la respuesta del material a dichas alteraciones. A través de este comportamiento es posible comprender los fenómenos de corrosión que se pueden presentar en el medio agresivo de estudio. (Fontana, 2005)

3.4.1 Curvas de polarización potenciodinámicas

Este ensayo es una técnica electroquímica de corriente continua que proporciona información acerca de la cinética de la corrosión y la susceptibilidad al ataque localizado. Para esto, es necesario aplicar rangos de potenciales amplios desde valores negativos, pasando por el potencial de corrosión denominado E_{corr} y continuando hasta valores positivos de potencial.

Las curvas de polarización resultantes muestran una rama catódica y una anódica, a partir de las cuales se obtiene información sobre las reacciones de oxidación y reducción que ocurren sobre la superficie del material. (Bárcena, 1997)

3.4.2 Pasivación

Un material se considera pasivo cuando, al ser expuesto a un medio corrosivo, se forma de manera espontánea una capa delgada de óxido en su superficie. Esta capa actúa como barrera protectora, reduciendo la velocidad de corrosión de dicho material. Este fenómeno es conocido como pasividad, común en metales como el aluminio.

La pasividad depende tanto de la composición y microestructura del material como de las condiciones del medio, incluyendo el pH, el potencial electroquímico y la presencia de agentes oxidantes. (Fontana, 2005).

3.4.3 Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS)

La técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica es una técnica electroquímica en corriente alterna, en estado no estacionario.

Se aplica una señal sinusoidal de voltaje de pequeña amplitud y variable en frecuencia que perturba al sistema, revelando información de los mecanismos presentes en el proceso de corrosión.

La respuesta generada en impedancia por este sistema se puede simular con circuitos equivalentes, los cuales conllevan a la interpretación de los mecanismos de corrosión presentes en el material en un medio determinado.

4 DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL

4.1 Materiales

Se utilizaron muestras de una aleación de aluminio AlSi10Mg obtenidas por fabricación aditiva con el método de fusión selectiva por láser SLM por sus siglas en inglés. Asimismo, se utilizaron muestras de la aleación comercial A356, las cuales se denominaron en este trabajo como muestra de referencia (REF) y fueron suministradas por el laboratorio, con el fin de comparar el comportamiento de la aleación obtenida por fabricación aditiva.

En la Tabla 2, se presenta la composición química tanto de la muestra de REF como del polvo metálico de AlSi10Mg utilizado en el proceso de fabricación aditiva.

Tabla 2.

Composición química de las aleaciones empleadas en este trabajo.

	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
Aleación de referencia A356	7.94 ± 0.12	0.10	<0.5	0.28 ± 0.02	<0.02	0.12	Bal.
Polvo metálico utilizado en el proceso SLM	10.49 ± 0.02	0.19 ± 0.01	<0.05	0.28 ± 0.01	<0.02	<0.05	Bal.

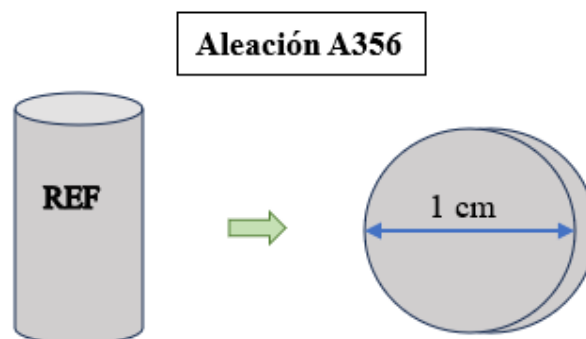
Nota: Tomado de (Conde, Gardon, G.A., Arenas, & de Damborenea, 2022)

En las Figuras 3 y 4 se muestran los bosquejos representativos y dimensiones de las muestras de referencia y fabricación aditiva respectivamente.

Las muestras denominadas REF presentaron una dimensión uniforme, ya que se obtuvieron de una única probeta por colada tradicional y suministrada por el laboratorio.

Figura 3.

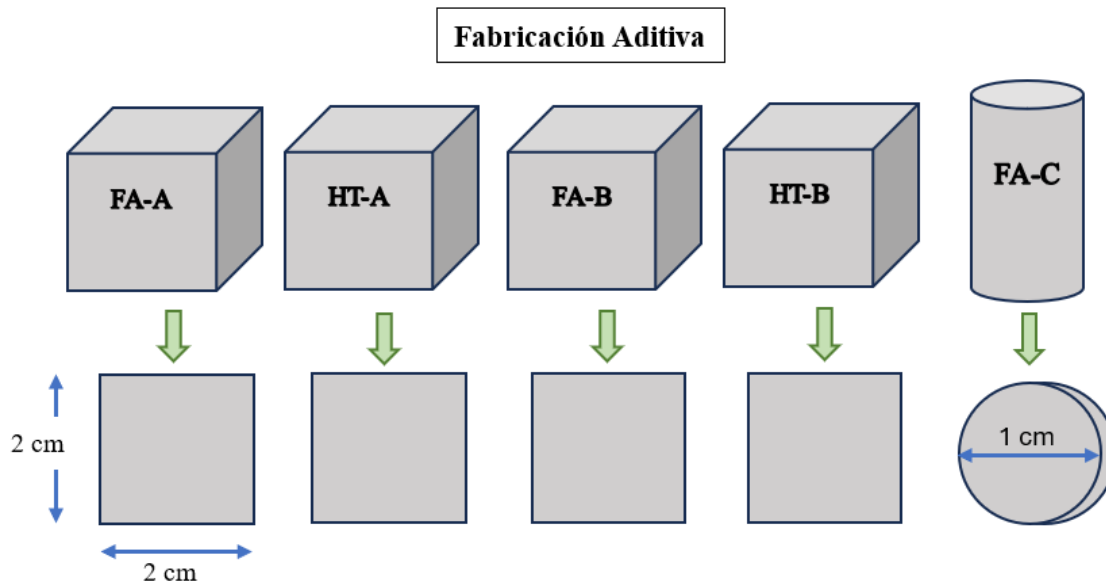
Bosquejo de las muestras de la Aleación A356, identificada a lo largo del trabajo como REF.



Nota: Elaboración propia.

Figura 4.

Bosquejo de las muestras de Fabricación Aditiva de acuerdo con sus características.



Nota: Elaboración propia.

La nomenclatura utilizada a lo largo de este proyecto se muestra en la Tabla 3, donde se describen las características principales de cada muestra según su obtención, orientación de deposición y tratamientos aplicados.

Tabla 3.

Denominación e identificación de las muestras utilizadas en el proyecto.

DENOMINACIÓN DE LA MUESTRA	DESCRIPCIÓN	FABRICACIÓN
REF	Aleación comercial A356 utilizada como referencia	Colada convencional
FA-A	Aleación AlSi10Mg con deposición desde una cara	Fabricación aditiva
FA-B	Aleación AlSi10Mg con deposición desde un vértice	Fabricación aditiva

FA-C	Aleación AlSi10Mg con deposición vertical plano XZ	Fabricación aditiva
HT-A	Muestra FA-A sometida a tratamiento térmico de recocido 573K durante 2 horas y enfriado al aire	Fabricación aditiva tratada térmicamente
HT-B	Muestra FA-B sometida a tratamiento térmico de recocido 573K durante 2 horas y enfriado al aire	Fabricación aditiva tratada térmicamente

Nota: Elaboración propia.

Los parámetros utilizados durante el proceso de fabricación aditiva se detallan en la Tabla A1 del **Apéndice A**. Estos valores corresponden a las condiciones de impresión utilizadas para la obtención de las muestras FA descritas previamente.

4.2 Preparación Superficial

Inicialmente, se realizó un desbaste con papel abrasivo de SiC, desde un tamaño de grano de 80 hasta 1200, empleando carnauba como lubricante con el fin de reducir las líneas del desbaste y obtener una superficie más uniforme.

4.3 Preparación Metalográfica

Para revelar la microestructura de todas las muestras se realizó una preparación metalográfica en la superficie la cual se llevó a cabo de la siguiente manera:

4.3.1 Pulido

El pulido para las muestras de REF se realizó con un paño MD-Mol 3 μm y un paño MD-Chem OP-S 0,04 μm . Para las muestras de FA se utilizó un paño MD-Mol 3 μm y un paño MD-Nap 1 μm . Como lubricante se utilizó DP-Lubricante Blue y como abrasivo, se empleó pasta de Diamante.

4.3.2 Ataque

Todas las muestras fueron sometidas a un ataque químico con una solución de HF al 0,05% + H₂O durante 5s - 10s a temperatura ambiente. Luego se aclararon con agua destilada para retirar residuos de la solución, se limpiaron con etanol y, finalmente, se secaron con aire caliente.

4.4 Microscopia óptica

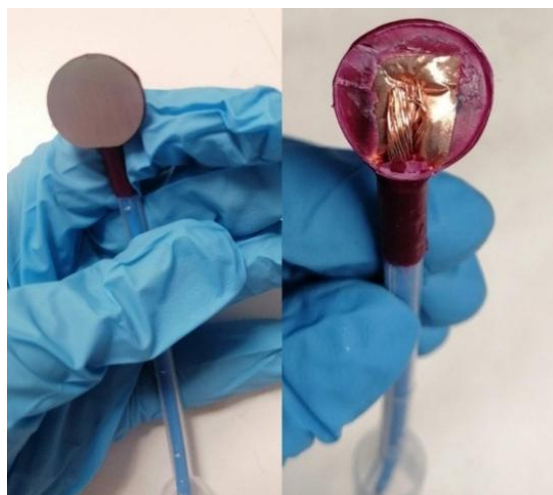
Posterior al ataque químico, se realizaron las micrografías empleando un microscopio óptico Olympus, con aumentos variados desde 50X hasta 1000X.

4.5 Montaje de las muestras

Para la caracterización electroquímica y el proceso de anodizado, se llevó a cabo un montaje en el que el contacto eléctrico se realizaba en la parte posterior de cada muestra con un cable, sujetado con cinta de cobre adhesiva. Este contacto fue recubierto con laca aislante para protegerlo del medio acuoso durante los ensayos, ver Figura 5.

Figura 5.

Figura del montaje realizado para cada muestra durante los ensayos electroquímicos.



Nota: Elaboración propia.

4.6 Anodizado

El proceso de anodizado se realizó en un electrolito de ácido sulfúrico, bajo condiciones potencioestáticas. Las condiciones de anodizado se recogen en la Tabla 4.

Tabla 4.

Variables de partida en el proceso de anodizado.

Solución de anodizado	Volumen de sln.	Potencial	Rampa de potencial/Tiempo	Temperatura	Agitación	Lavado
0,4M H ₂ SO ₄	250 ml	20 V	4V/min hasta 20V durante 4 min + 16 min.	35°C	390 rpm	H ₂ O por 15 min – 3 veces.

Nota: Elaboración propia.

Inmediatamente después del proceso de anodizado, las muestras fueron limpiadas con etanol, secadas con aire caliente y posteriormente llevadas a un desecador. Durante el proceso de anodizado se recogieron las curvas de densidad de corriente en función del tiempo para todas las muestras y se utilizaron como criterio de control y aceptación del proceso.

4.7 Mojabilidad Superficial

El ángulo de contacto se midió empleando agua destilada como líquido de ensayo para las muestras antes y después del anodizado. Se empleó un equipo de medida de ángulo de contacto y tensión superficial con multi-dispensador automático de líquidos, (Tabla 5).

Tabla 5.

Parámetros utilizados en la prueba de mojabilidad.

Líquido dispensador	H ₂ O desionizada
Volumen de la gota	3 μ L
Tiempo	10 s
Cantidad de mediciones recogidas	60

Nota: Elaboración propia.

4.8 Rugosidad

La rugosidad superficial se caracterizó mediante un perfilómetro confocal e interferométrico con un objetivo EPI X20. Esta caracterización se llevó a cabo en todas las muestras mencionadas.

4.9 Ensayos electroquímicos

4.9.1 Curvas de polarización potenciodinámicas

Estos ensayos se realizaron con un potenciostato Gamry Ref600, que permitió registrar el potencial de corrosión y realizó la polarización del sistema en el rango de potenciales establecidos, midiendo la densidad de corriente correspondiente a cada punto (Tabla 6).

Tabla 6.

Condiciones experimentales empleadas las curvas de polarización

Solución de ensayo	Áreas	Potencial inicial	Vel barrido	Potencial final	i máx.
0,6 M NaCl	3,14 – 4,4 cm ²	-0.3 V vs. E _{corr}	0,167 mV/s	1,5 V	0,5 mA/cm ²

Nota: Elaboración propia.

4.9.2 Espectroscopia de Impedancia Electroquímica

Bajo los parámetros de la Tabla 7 se llevaron a cabo ensayos de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS), los cuales permitieron analizar el mecanismo de los procesos de corrosión presentes en cada muestra de estudio en un mismo medio.

Tabla 7.

Condiciones experimentales utilizadas en los ensayos de EIS.

Solución de ensayo	Áreas	Frecuencia inicial	Frecuencia final	Amplitud	Z estimada.
0,6 M NaCl	3,14 – 4,4 cm ²	100000 Hz	0.01 Hz	3. 53 mV rms	100 ohm

Nota: Elaboración propia.

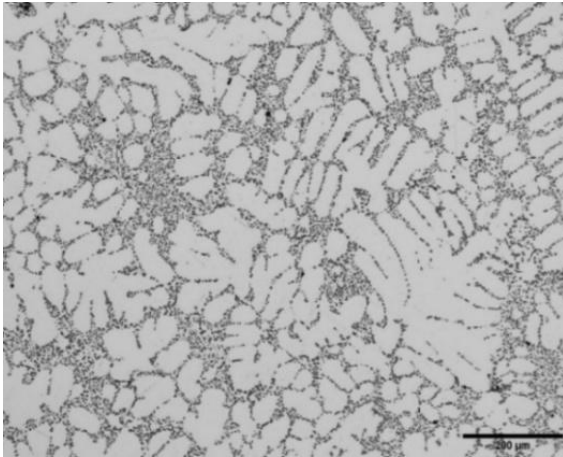
5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Caracterización metalográfica

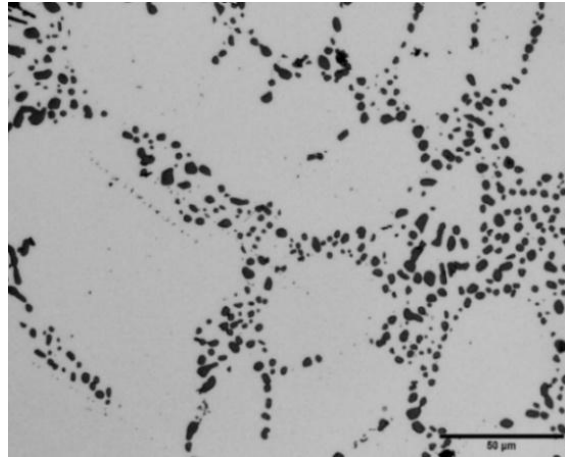
Las Figuras 6 y 7 muestran las micrografías del aluminio A356 de referencia REF, una aleación hipoeutéctica obtenida por colada. Su microestructura está compuesta por una matriz de fase α -Al en forma de dendritas junto a partículas de silicio con morfología globular situadas en las regiones interdendríticas. Más información de esta microestructura puede encontrarse en (Durán, 2024)

Figura 6.

Micrografía óptica aleación A356 con ataque químico (HF 0,05% + H₂O) a 100X.

**Figura 7.**

Micrografía óptica aleación A356 con ataque químico (HF 0,05% + H₂O) a 500X.



Las micrografías de las muestras de fabricación aditiva (FA y FA-HT) revelan, en la sección transversal, una microestructura formada por dendritas de fase α -Al con partículas interdendríticas con morfología homogénea en forma de “escama de pez” (Figura 8 y 9). En la sección longitudinal hay una estructura celular, morfología típica del proceso de solidificación rápida bajo la técnica SLM, (Figuras 10 y 11). La microestructura formada se atribuye a la composición química del polvo, particularmente por el contenido de Silicio, el cual se redistribuye en los límites de célula durante el enfriamiento rápido. Esta distribución interdendrítica concuerda con lo observado en trabajos publicados en la bibliografía (Alghamdi, y otros, 2021)

Figura 7.

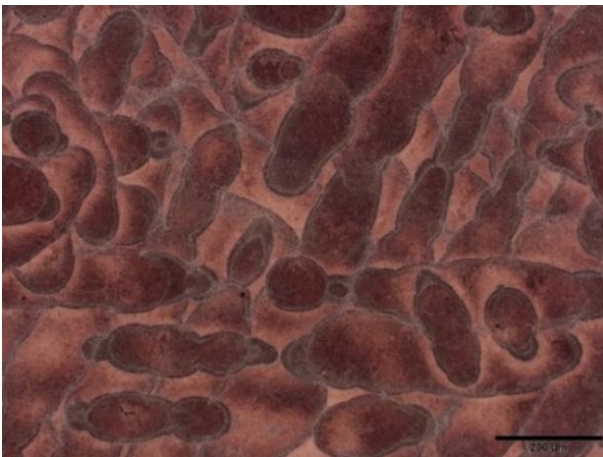
Micrografía óptica de sección transversal aleación AlSi10Mg con ataque químico (HF 0,05% + H₂O) a 100X.

**Figura 8.**

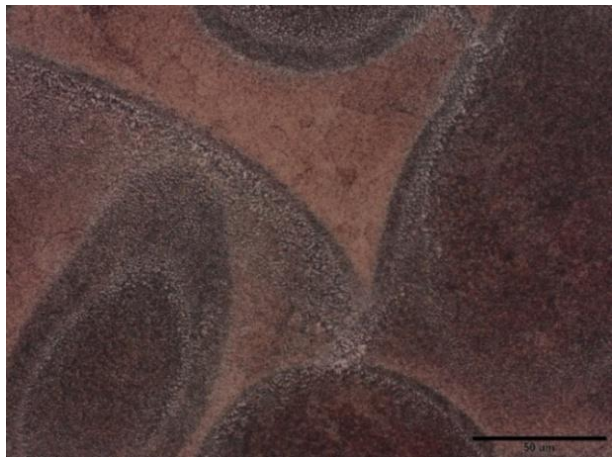
Micrografía óptica de sección transversal aleación AlSi10Mg con ataque químico (HF 0,05% + H₂O) a 500X.

**Figura 9.**

Micrografía óptica de sección longitudinal aleación AlSi10Mg con ataque químico (HF 0,05% + H₂O) a 100X.

**Figura 10.**

Micrografía óptica de sección longitudinal aleación AlSi10Mg con ataque químico (HF 0,05% + H₂O) a 50X.



5.2 Anodizado

En las Figuras B1 a B4 del **Apéndice B** se muestran las curvas de intensidad vs. tiempo obtenidas durante el anodizado de las muestras. Las curvas de anodizado recogidas indican que la capa crecida presenta una morfología porosa, al inicio del proceso de anodizado se detectó una corriente inicial elevada que disminuyó de forma progresiva hasta un mínimo de corriente. Este comportamiento se debe a la formación de una película de óxido barrera sobre la superficie del aluminio: a medida que la capa de óxido aumenta su espesor, aumenta la resistencia al paso de corriente y, por lo tanto, la intensidad disminuye, fenómeno característico de los procesos de pasivación durante el anodizado. Una vez alcanzado el mínimo de corriente, se nuclean los poros en la superficie. A continuación, se produce un aumento de la corriente hasta alcanzar un valor estable que está relacionado con el crecimiento de los poros.

Este proceso se presentó de manera similar en ambos materiales de estudio, aunque con diferentes valores de intensidad. Las muestras tratadas térmicamente (HT) revelaron un comportamiento más estable en las curvas de corriente, lo cual puede atribuirse al efecto del recocido, que favorece el crecimiento de la capa barrera tras un alivio de tensiones internas, permitiendo obtener una microestructura más homogénea. (Conde, Gardon, G.A., Arenas , & de Damborenea, 2022)

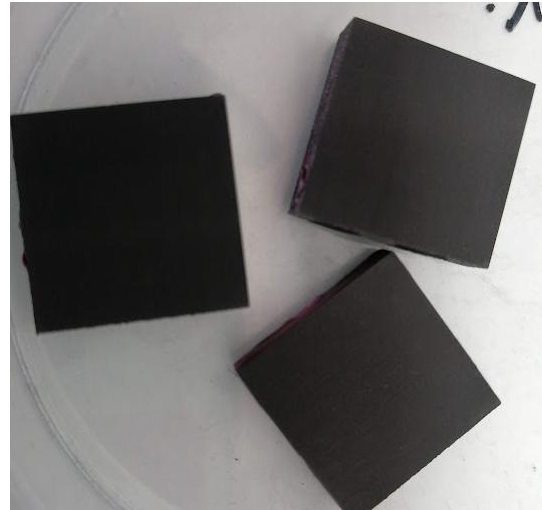
Tras el proceso de anodizado, las muestras presentan un aspecto diferente: las de fabricación aditiva FA mostraron una tonalidad negra uniforme sobre toda el área anodizada (Figura 13), mientras que las de REF presentaron un color gris con puntos negros dispersos en la superficie (Figura 12), posiblemente debido a las características metalúrgicas de la aleación.

Figura 11.

Acabado de la muestra de REF tras el proceso de anodizado

**Figura 12.**

Acabado de las muestras de FA tras el proceso de anodizado.



5.3 Caracterización de las capas anódicas

5.3.1 Rugosidad y mojabilidad superficial

Según lo mostrado en el **Apéndice C** (Figura C1), tras el anodizado se observa un aumento en la rugosidad de la superficie de las muestras de REF, asociado a la formación de una capa de óxido más porosa e irregular, característico de los recubrimientos formados por anodizado en medio ácido.

Por su parte, las muestras de fabricación aditiva FA-A, B y C disminuyeron su rugosidad (Figuras C2 a C4), esto puede atribuirse a la homogeneidad de la capa de óxido barrera formada que se encuentra en toda la superficie, el anodizado en estas condiciones tiende a rellenar micro cavidades y cubrir irregularidades generados durante la fabricación SLM. (Haowen, y otros, 2024).

Las muestras tratadas térmicamente HT-A y HT-B) mostraron una mayor disminución de rugosidad, impartiendo solidez a la hipótesis de que el tratamiento térmico genera una

microestructura más homogénea, creando una capa barrera más uniforme tras el anodizado. (Conde, Gardon, G.A., Arenas, & de Damborenea, 2022)

Asimismo, en las Figuras C7 a C11 se presentan imágenes de la topografía superficial de las muestras REF, FA y HT, respectivamente. Antes del proceso de anodizado se observa las marcas de pulido, siendo más pronunciadas en el caso de REF y en las muestras HT una textura intermedia entre REF y FA, debido a una posible modificación superficial por el tratamiento térmico. Tras el anodizado, la muestra REF genera una capa más porosa y rugosa, mientras que las muestras FA y, especialmente las HT, presentaron una capa más homogénea, indicando que el tratamiento favorece el crecimiento de la capa anódica. Este comportamiento guarda coherencia con los resultados obtenidos en las gráficas de rugosidad, donde se observaron las mediciones de rugosidad recogidas en la práctica.

En cuanto a la mojabilidad, se observó una variación en el ángulo de contacto en todos los materiales analizados, la cual indica una modificación en la energía superficial de provocada por la capa de óxido durante el proceso de anodizado. Tal como se muestra en las Figuras C12 a C17, se registró una disminución del ángulo de contacto, indicando una mayor afinidad de la superficie por el agua, haciendo que la superficie sea más hidrofílica tras el proceso de anodizado.

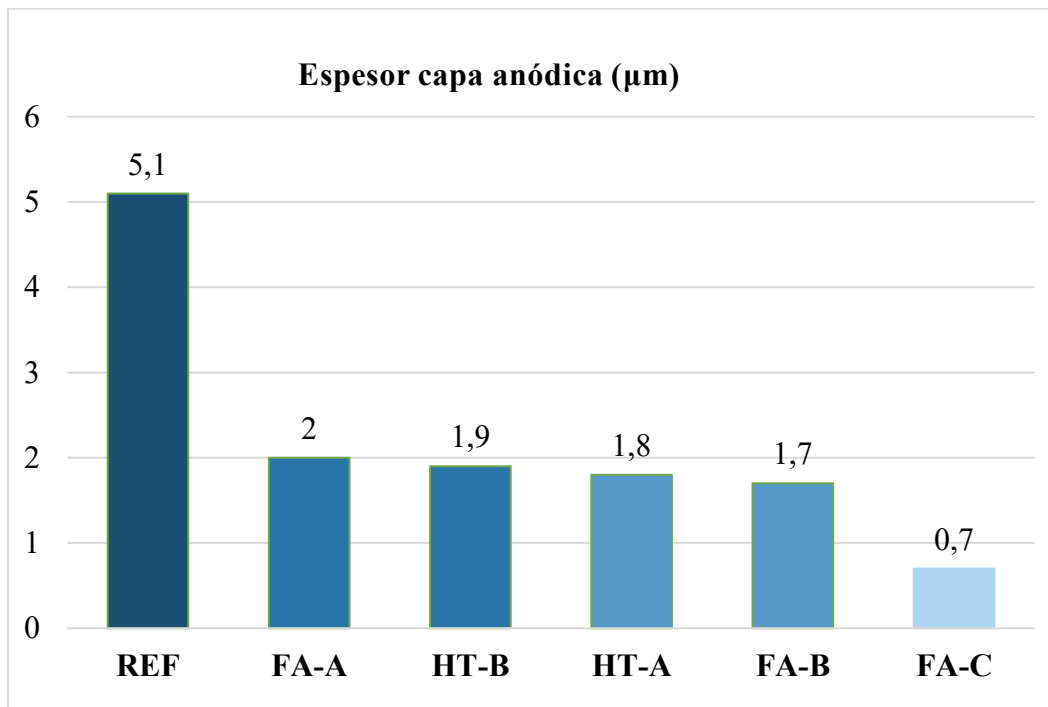
5.3.2 Espesor capa anódica

Los espesores de las capas anódicas fueron medidos mediante una sonda magnética, de acuerdo con la Figura 14, la muestra de REF presentó el mayor espesor de la capa de óxido depositada ($5,1 \mu\text{m}$), mientras que las muestras obtenidas por fabricación aditiva FA, presentaron espesores menores. La muestra FA-C registró el valor más bajo ($0,7 \mu\text{m}$), este valor puede atribuirse a la microestructura presenta por esta muestra. Las muestras FA-A y FA-B y las tratadas térmicamente (HT-A y HT-B) mostraron espesores con valores intermedios entre ($1,7 - 2 \mu\text{m}$), el

rendimiento de este proceso se puede atribuir a una posible distribución homogénea de partículas nanométricas de silicio.

Figura 13 .

Espesor de las capas anódicas de las muestras de estudio



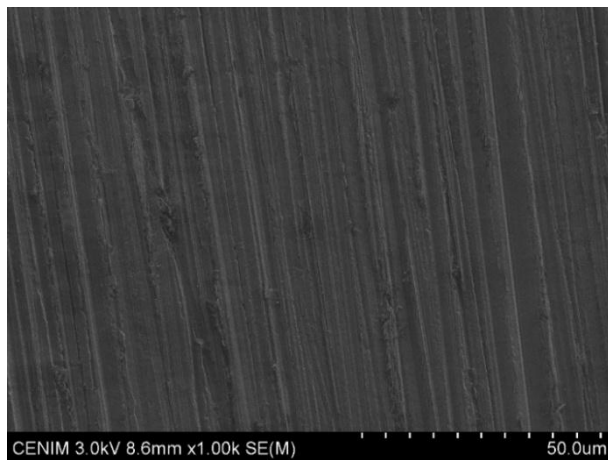
Nota: Elaboración propia.

5.3.3 Microscopía electrónica de Barrido (SEM)

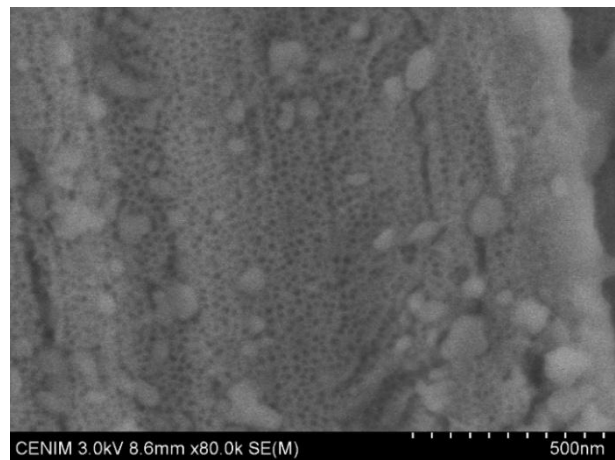
En las micrografías SEM (Figuras 15 a 18) se observan las superficies anodizadas de las muestras de fabricación aditiva FA-B y HT-B. Ambas muestras presentan una morfología porosa típica del anodizado en H_2SO_4 , con un diámetro promedio de poro de 30 ± 5 nm, resultados obtenidos tras el análisis de las imágenes en el software ImageJ. En la muestra HT-B (Figura 18), se observa una distribución más homogénea de los poros en comparación FA-B (Figura 16), atribuida al efecto del tratamiento térmico en la microestructura del material.

Figura 14.

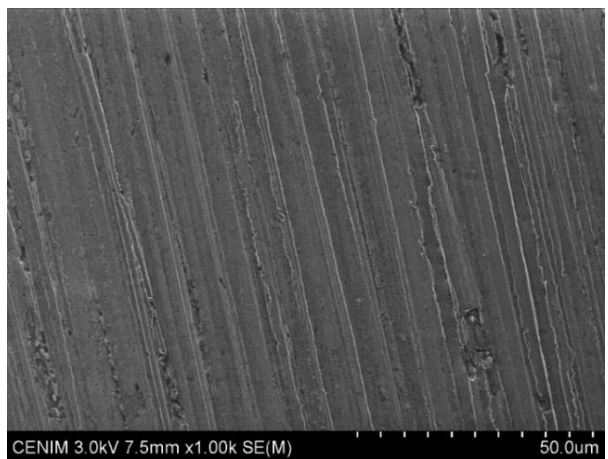
Micrografía SEM de la muestra FA-B anodizada en H_2SO_4 .

**Figura 15.**

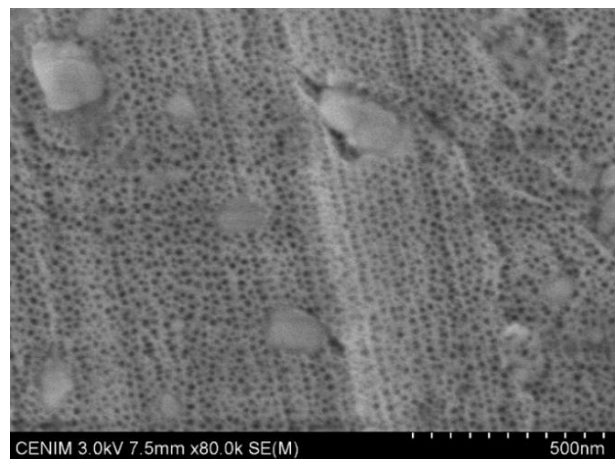
Micrografía SEM de la muestra FA-B anodizada en H_2SO_4 .

**Figura 16.**

Micrografía SEM de la muestra HT-B anodizada en H_2SO_4 .

**Figura 17.**

Micrografía SEM de la muestra HT-B anodizada en H_2SO_4 .



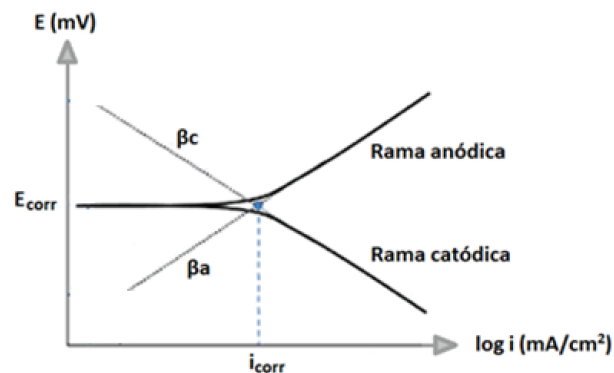
5.4 Ensayos electroquímicos

5.4.1 Curvas de polarización

Mediante esta técnica electroquímica se obtuvo información sobre la cinética de corrosión, es decir, sobre la velocidad de corrosión y el mecanismo que la controla. La Figura 19 muestra una curva de polarización esquemática con los parámetros del método de las pendientes de Tafel. Este método se empleó en las muestras antes y después de anodizar para evaluar la influencia del tratamiento superficial en su comportamiento electroquímico.

Figura 18 .

Ejemplo de curvas de polarización con el método de extrapolación de Tafel.



Nota: Tomado de (OriginLab, s.f.)

El potencial de corrosión, E_{corr} , es el potencial donde la corriente pasa de ser catódica a anódica, es característico de un proceso electroquímico corrosivo. La densidad de corriente de corrosión, i_{corr} , representa la intensidad que circular a través de la pila electroquímica en dicho potencial. Según el método Tafel (Bárcena, 1997), al tener un control por activación en ambas ramas de la curva, se pueden extrapolar las zonas lineales para obtener las pendientes β_c y β_a , cuyo punto de corte en el eje y indica el valor de E_{corr} y en el eje de abscisas el valor de i_{corr} .

Para la correcta aplicación de este método, es necesario identificar una zona lineal que se extienda aproximadamente una década en el eje $\log i$, dentro de un rango de 75-100 mV respecto al E_{corr} . La ecuación general de Tafel y las ecuaciones para hallar sus pendientes son las siguientes:

$$\eta = a + b \cdot \log(i) \quad (1)$$

Rama anódica:

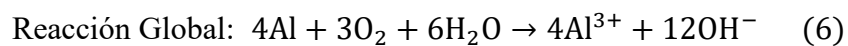
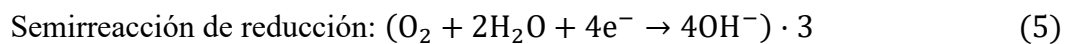
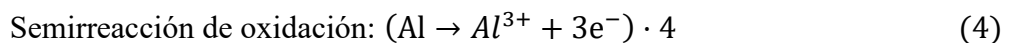
$$\eta_a = \beta_a \cdot \log(i/i_{corr}) \quad (2)$$

Rama catódica:

$$\eta_c = \beta_c \cdot \log(i/i_{corr}) \quad (3)$$

Los ensayos se realizaron en un medio acuoso y abierto al aire, por lo que las reacciones electroquímicas observadas fueron uniformes en todas las muestras. En el proceso anódico se produce la oxidación del Al y en el proceso catódico, la reducción del O_2 .

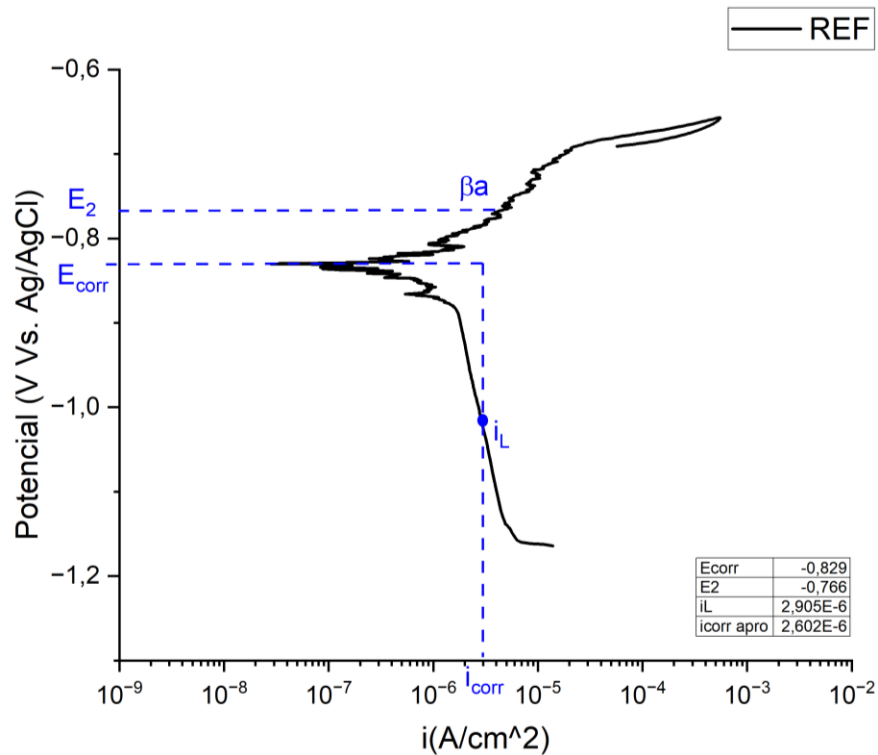
Las reacciones globales que describen estos procesos se presentan a continuación:



En la Figura 20 se muestra la curva de polarización de la muestra de REF, utilizada para estimar los parámetros cinéticos de corrosión mediante el método Tafel.

Figura 19.

Curva de polarización de la muestra de REF antes del anodizado en NaCl 0.6M.



Nota: Elaboración propia.

La rama anódica presenta un comportamiento pseudopasivo, atribuido a la formación de una capa de óxido de aluminio (Al_2O_3) de pequeño espesor, que limita la disolución del metal, es decir, disminuye la velocidad de corrosión.

Se recurre a la ecuación general de Tafel y sus ecuaciones específicas para la rama anódica, utilizando el valor de i_{corr} como punto de corte en entre la pendiente anódica (O_a , β_a) y el potencial

E_{corr} :

$$E_{corr} = O_a + \beta_a \cdot \log i_{corr} \quad (7)$$

$$i_{\text{corr}} = 10^{\frac{E_{\text{corr}} - O_a}{\beta_a}} \quad (8)$$

En la rama catódica, tanto para REF y FA, presentan una pendiente vertical, indicando un control por difusión con una caída abrupta del potencial y un leve cambio en la densidad de corriente. En estas condiciones, β_c tiende a un valor muy alto, siendo $\beta_c = \infty$, y la intensidad de corrosión, i_{corr} , corresponde a la intensidad límite de difusión, i_{dif} . (Shen Lin, 2022)

En este caso, la cinética del proceso está controlada principalmente por la velocidad a la que el O_2 disuelto alcanza la superficie del metal. A partir de la curva de polarización, la ecuación de la rama anódica se obtiene la pendiente anódica:

Tomando E_2 con una diferencia entre 75-100 mV respecto al E_{corr} :

$$\eta_a = E_2 - E_{\text{corr}} = -0,766 - (-0,829) = 0,063 \text{ V}$$

$$\eta_a = \beta_a \cdot \log\left(\frac{i_2}{i_{\text{corr}}}\right) \rightarrow \beta_a = \frac{\eta_a}{\log\left(\frac{i_2}{i_{\text{corr}}}\right)}$$

Asumiendo el valor de i_2 , con una década de diferencia respecto a i_{corr} :

$$\log\left(\frac{10^{-5}}{2,602 \times 10^{-6}}\right) = \log(3,845) \approx 0,584$$

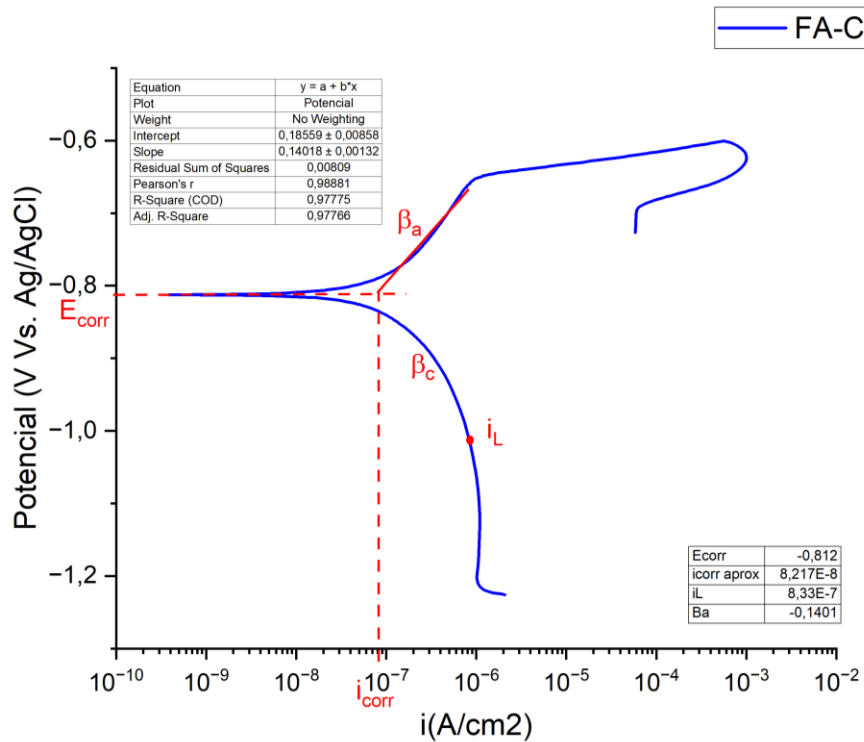
Finalmente se obtiene:

$$\beta_a = \frac{0,063}{0,584} = 0,1078 \frac{\text{V}}{\text{dec}} \approx 107,8 \frac{\text{mV}}{\text{dec}}$$

En la Figura 21 se muestra la gráfica para FA-C, siendo esta muestra adaptable al método de las pendientes de Tafel.

Figura 20.

Curva de polarización FA-C con ajuste de Tafel.



Los valores obtenidos fueron

$$i_L = 8,330 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$$

$$E_{\text{corr}} = -0,812 \text{ V}$$

Tras calcular la pendiente anódica, se obtuvo:

$$O_a = 0,186 \text{ V} \quad \beta_a = 0,140 \text{ V}$$

Empleando la ecuación 7, se obtiene la densidad de corriente de la rama anódica

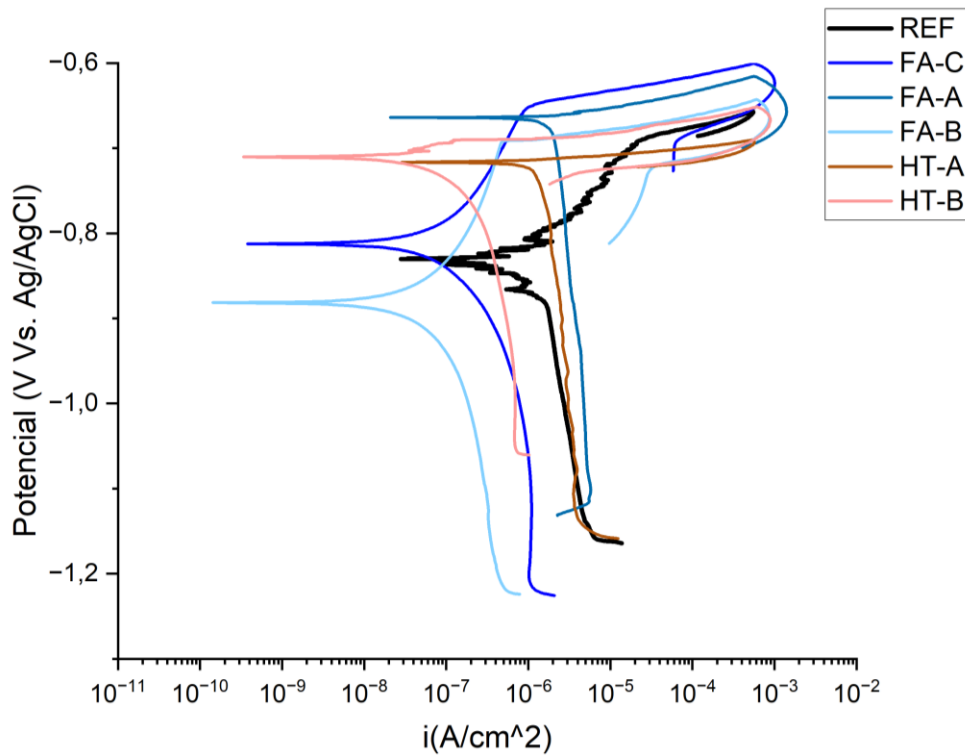
$$i_{\text{corr}} = 7,447 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$$

De forma general, las curvas correspondientes a las muestras de fabricación aditiva presentan un potencial de corrosión E_{corr} y una rama catódica notablemente variables,

evidenciando diferencias en a la cinética de reducción del oxígeno (Figura 22). Estas variaciones se atribuyen a la orientación de impresión, y en las HT, al efecto adicional del tratamiento térmico. En comparación con la muestra de REF, se observa que estos factores influyen en el comportamiento inicial de las superficies. Las muestras FA-A y HT-A presentan un comportamiento análogo desde el punto de vista de cinética de corrosión que la muestra REF.

Figura 21.

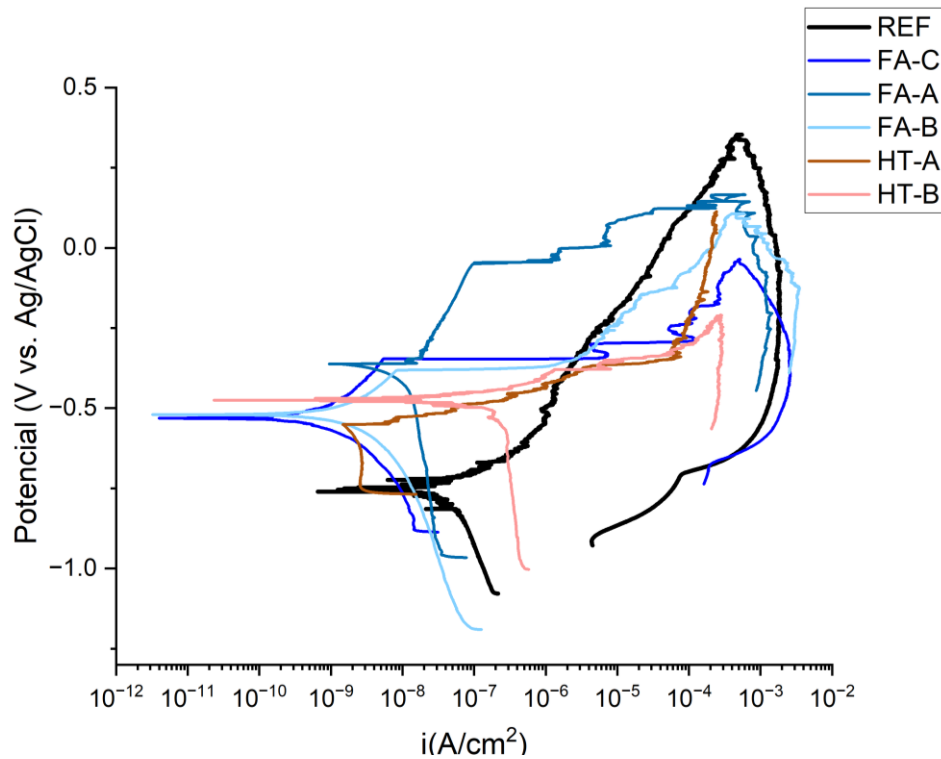
Curvas de polarización cíclicas de las muestras REF, FA (A, B, C) y HT (A, B) en estado inicial.



Tras el anodizado, se registraron las curvas de polarización para todas las muestras bajo las mismas condiciones de ensayo. Los resultados se presentan en la Figura 23.

Figura 22.

Curvas de polarización cíclica de las muestras REF, FA (A, B, C) y HT (A, B) anodizadas en H_2SO_4 0,4 M a 35 °C.



En este gráfico se evidencian las diferencias en el comportamiento electroquímico tras el crecimiento de la capa protectora. La muestra de REF anodizada presenta una mayor densidad de corriente de corrosión, indicando una menor resistencia a la corrosión, mientras que las muestras FA anodizadas presentaron una disminución significativa de i_{corr} junto con un desplazamiento del potencial de corrosión E_{corr} , indicando una mayor resistencia a la corrosión del material. En las muestras HT-A, se observa como la presencia de la capa anódica mejora el comportamiento frente a la corrosión de las muestras sin anodizar, atribuyéndose a la combinación de la orientación de impresión y el tratamiento térmico.

A partir del análisis de Tafel, aplicado de manera directa con las pendientes y con los criterios de selección basados en la tendencia general de las ramas anódica y catódica, se logró recopilar los valores de E_{corr} , i_{corr} y β_a para las muestras evaluadas antes y después del proceso de anodizado. Estos parámetros electroquímicos se resumen en la Tabla 8.

Tabla 8.

Resultados obtenidos de las curvas de polarización

MUESTRA	CONDICIÓN	E_{corr} (V)	I_{corr} (A/cm²)	I_{corr} (μA/cm²)	Ba (mV/dec)
REF	Estado base	-0,829	2,61E-06	2,605	107,8
	Anodizada	-0,795	1,07E-07	0,107	-
FA-C	Estado base	-0,812	7,45E-08	0,074	140
	Anodizada	-0,530	7,95E-09	0,008	-
FA-A	Estado base	-0,668	3,77E-06	3,773	-
	Anodizada	-0,372	1,94E-08	0,019	-
FA-B	Estado base	-0,883	2,02E-07	0,202	-
	Anodizada	-0,523	1,83E-08	0,018	-
HT-A	Estado base	-0,713	2,22E-06	2,221	-
	Anodizada	-0,550	2,61E-09	0,003	-
HT-B	Estado base	-0,710	4,03E-07	0,403	-
	Anodizada	-0,477	3,58E-07	0,358	-

Nota: Elaboración propia

A partir de estos valores y utilizando la ecuación de velocidad de corrosión descrita en el **Apéndice D**, se calcularon las cinéticas de corrosión para cada muestra. Los resultados se presentan en la Tabla 9. El proceso de anodizado supone una disminución de la cinética de corrosión de más de un orden de magnitud con respecto a la muestra sin anodizar. Esta mejora es

aún más notable, hasta tres órdenes de magnitud, para la muestra HT-A con respecto a esta misma muestra sin anodizar.

La velocidad de corrosión está expresada en mm/año, permitiendo medir la tasa de degradación del material en el medio expuesto.

Tabla 9.

Velocidad de corrosión de las muestras estudiadas.

MUESTRA	CONDICIÓN	Velocidad de corrosión (mm/año)
REF	Estado base	0,02839
	Anodizada	0,00117
FA-C	Estado base	0,00081
	Anodizada	0,00009
FA-A	Estado base	0,04113
	Anodizada	0,00021
FA-B	Estado base	0,00220
	Anodizada	0,00020
HT-A	Estado base	0,02421
	Anodizada	0,00003
HT-B	Estado base	0,00439
	Anodizada	0,00390

Nota: Elaboración propia.

Los valores obtenidos se pueden verificar en otros resultados en trabajos ya existentes. La resistencia a la corrosión del material puede ser evaluada con la velocidad de corrosión, Tabla 10.

Tabla 10.

Resistencia a la corrosión en función de V_{corr} .

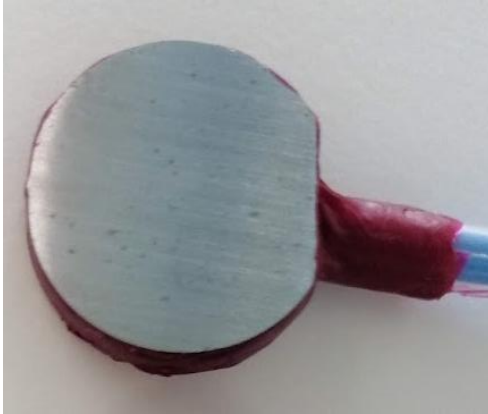
Resistencia a la corrosión	V_{corr} (mm/año)
Excelente	< 0.02
Muy bueno	0.02 - 0.1
Buena	0.1 – 0.5
Media	0.5 – 1
Mala	1 – 5
Inaceptable	> 5

Nota: Tomado de (Bárcena, 1997)

Las curvas de polarización obtenidas permiten concluir que la velocidad de corrosión disminuye de manera significativa tras el proceso de anodizado, indicando una mejora en la resistencia a la corrosión. En el estado base la resistencia a la corrosión se califica como buena y después del anodizado se considera excelente. En términos comparativos, las muestras de fabricación aditiva muestran valores de resistencia a la corrosión superiores a los de la muestra de REF.

Estos resultados se pueden contrastar con lo reportado por (Tiwari, Singh, & Jayaganthan, 2023), quienes empleando condiciones similares obtuvieron que la muestra de fabricación aditiva presenta en 2 y 3 veces mayor resistencia a la corrosión que su contraparte fundida, debido a la microestructura más homogénea favoreciendo a la formación de la capa pasiva.

Visualmente, en las Figuras 24 a 27, después de los ensayos de polarización las muestras sin anodizar mostraron mayor signo de ataque y corrosión localizada, mientras que las muestras anodizadas conservaron una superficie más estable, reflejando la respuesta protectora de la capa anódica y coherente con la disminución de V_{corr} .

Figura 23.*REF sin anodizar tras curvas de polarización***Figura 24.***REF anodizado tras curvas de polarización***Figura 25.***FA sin anodizar tras curvas de polarización***Figura 26.***FA anodizada tras curvas de polarización.*

5.4.2 Espectroscopía electroquímica de impedancia (EIS)

La Espectroscopía electroquímica de impedancias (EIS) permite interpretar los procesos de corrosión de un metal a través de circuitos equivalente que modelizan el comportamiento de la interfase electrodo-electrolito. Estos circuitos eléctricos están compuestos por elementos eléctricos

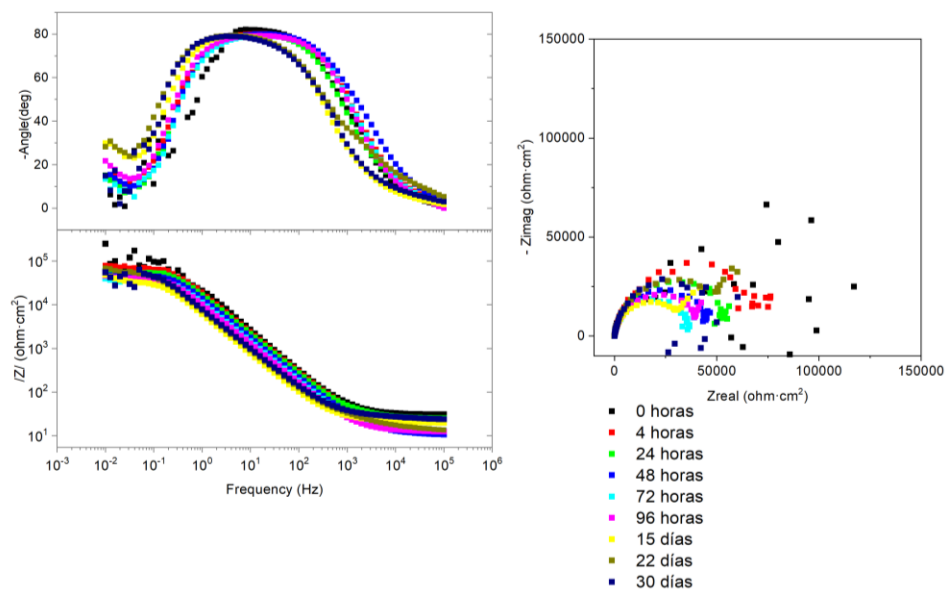
como resistencias (R), capacidades (C) e inductancias (L), proporcionando una respuesta eléctrica del sistema.

Estos análisis de los diagramas de impedancia proporcionan información sobre los procesos electroquímicos presentes en el metal como en la capa de óxido, permitiendo evaluar los parámetros implicados en el mecanismo de corrosión. (Bárcena, 1997)

En las Figuras 28 a 31 se presenta los resultados de EIS obtenidos en los ensayos realizados para la muestra de referencia REF y de fabricación aditiva FA-C, antes y después del proceso de anodizado.

Figura 27.

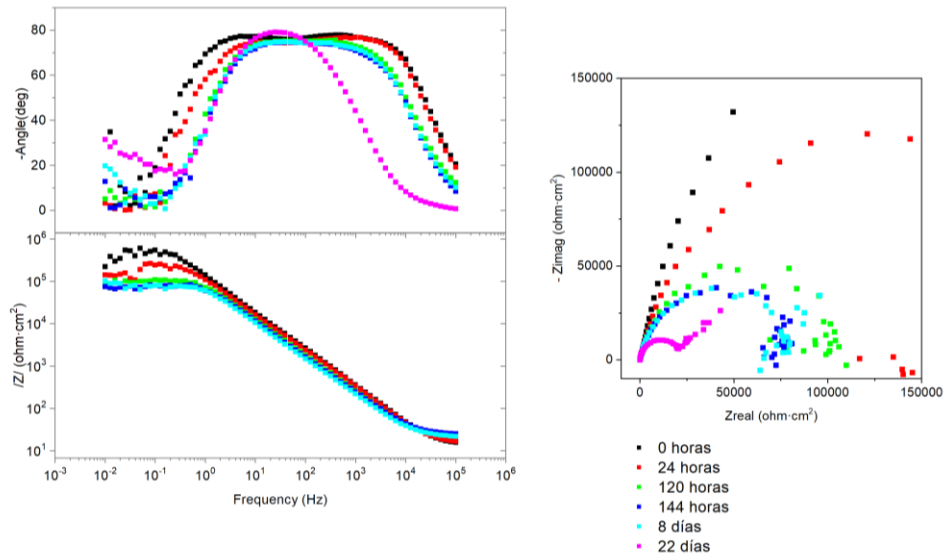
Evolución de los diagramas de EIS en la muestra REF en NaCl 0,6M a los 30 días de inmersión.



Nota: Elaboración propia.

Figura 28.

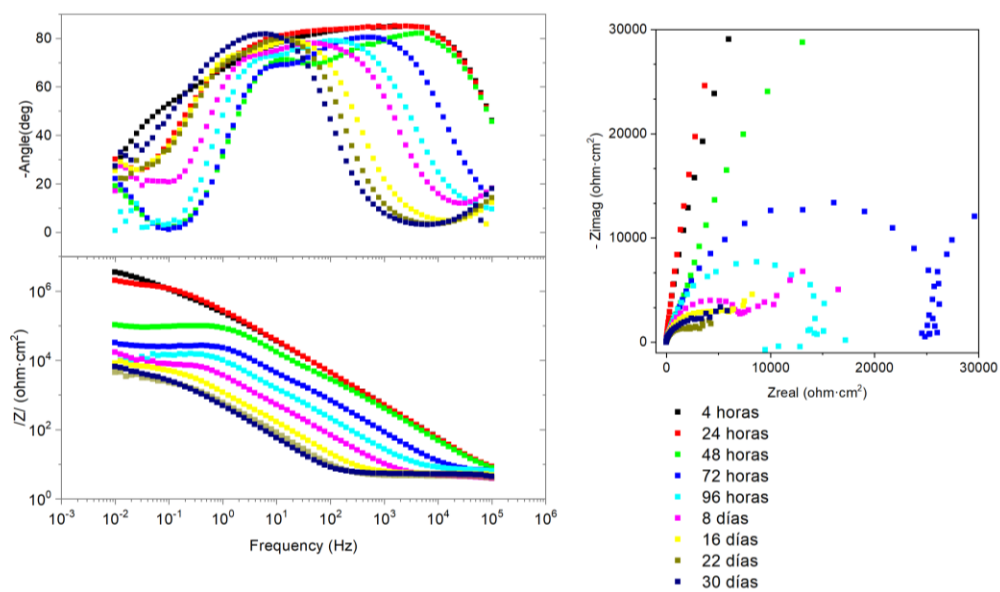
Evolución de EIS en la muestra REF anodizado en H2SO4 en NaCl 0,6M a los 30 días de inmersión.



Nota: Elaboración propia.

Figura 29.

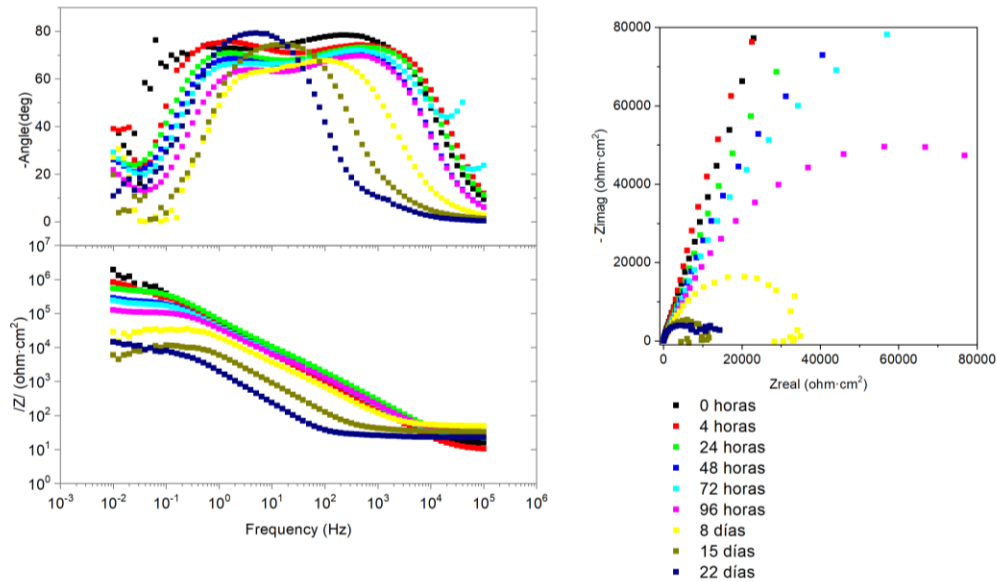
Evolución de los diagramas de EIS en la muestra FA en NaCl 0,6M los 30 días de inmersión.



Nota: Elaboración propia.

Figura 30.

Evolución de EIS en la muestra FA anodizado en H_2SO_4 en $NaCl$ 0,6M a los 30 días de inmersión.

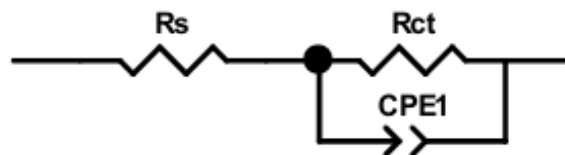


Nota: Elaboración propia.

En el **Apéndice E** se describen detalladamente los fundamentos teóricos del análisis mediante diagramas de Nyquist y Bode, junto con el procedimiento para determinar los parámetros de capacitancia y resistencia a la transferencia de carga. En la Figura 32, se observa el circuito equivalente obtenido que modela el comportamiento electroquímico del sistema para tiempos cortos de inmersión.

Figura 31.

Circuito equivalente para las muestras de REF y FA a las 4 horas de inmersión en $NaCl$ 0,6M

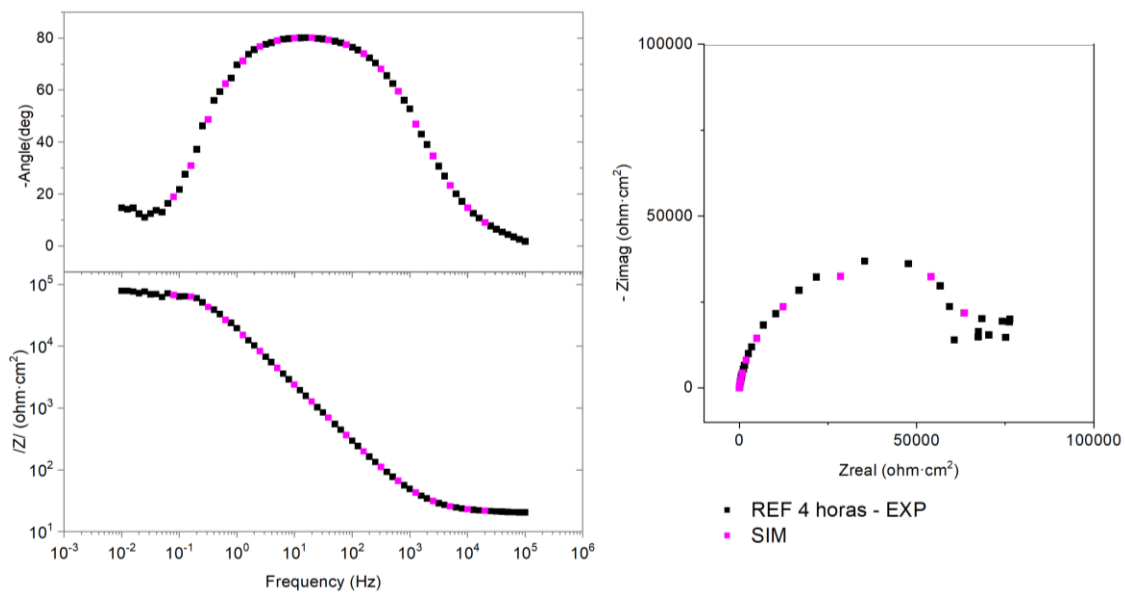


Nota: Elaboración propia.

Tras simular el comportamiento del sistema mediante el software ZView, utilizando el circuito equivalente propuesto, se obtuvo una excelente concordancia entre los datos experimentales y obtenidos por el ajuste (Figura 33), lo que valida el modelo para describir los procesos de transferencia de carga y el comportamiento capacitivo del sistema.

Figura 32.

Diagramas de EIS experimentales y simulados para la muestra REF durante 4 horas de inmersión en NaCl 0,6M.



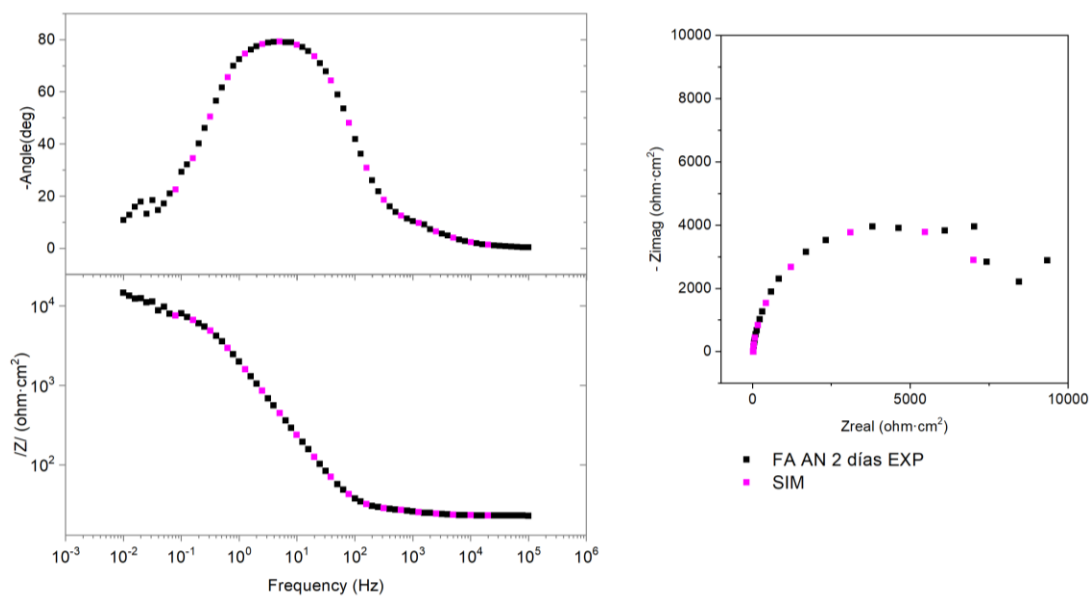
Nota: Elaboración propia.

Los valores de χ^2 obtenidos se encuentran en el orden de $10^{-2} - 10^{-3}$, lo cual se considera aceptable según la literatura (Orazem & Tribollet, 2017). Asimismo, en todos los casos los parámetros ajustados presentaron errores relativos menores al 15%, confirmando la validez del modelo empleado. Los datos completos de ajuste para las muestras REF y FA, antes y después del anodizado, se presentan en el **Apéndice F**.

Para tiempos largos de inmersión (Figura 34, muestra FA anodizada tras 22 días de inmersión), la respuesta electroquímica parece estar controlada por un único proceso, asociado a la capa barrera del anodizado. En esta condición, el circuito equivalente utilizado para los tiempos cortos de inmersión resulta adecuado a este tiempo de inmersión.

Figura 33.

EIS experimental y simulado de FA anodizada en H_2SO_4 tras 22 días de inmersión en $NaCl$ 0,6M.



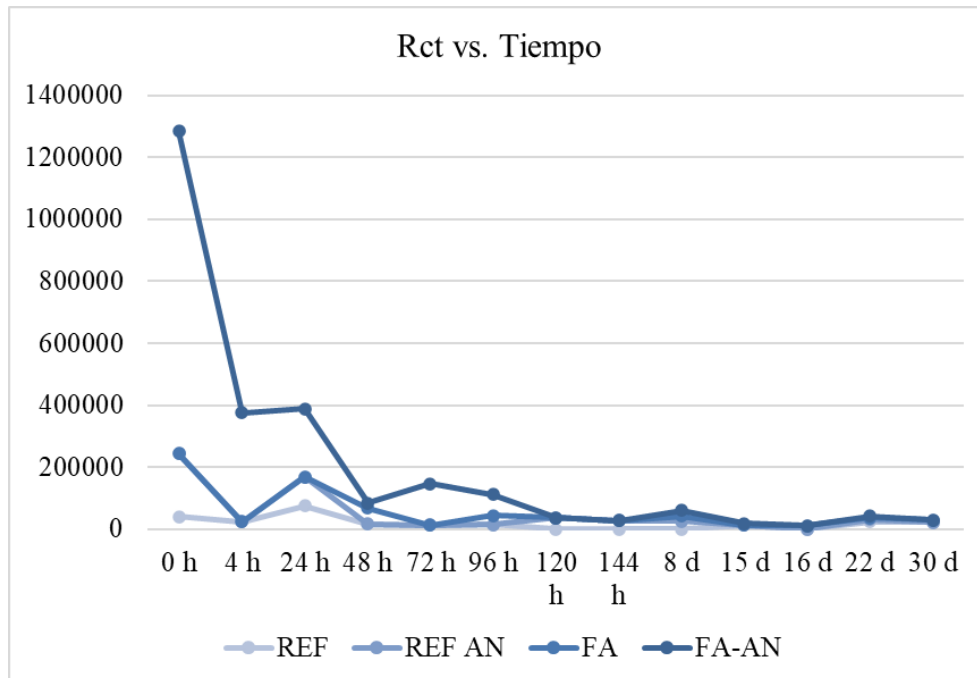
Nota: elaboración propia.

La resistencia a la transferencia de carga R_{ct} muestra una tendencia decreciente a medida que pasa el tiempo en todas las muestras (Figura 35), reflejando la pérdida progresiva de la protección frente a la corrosión. A tiempos cortos de inmersión, las muestras anodizadas presenten valores superiores de R_{ct} en comparación con las muestras sin anodizar, confirmando que la capa anódica incrementa la resistencia del sistema frente a los procesos corrosivos. En el análisis comparativo, la muestra REF presentó valores más bajos de R_{ct} , mientras que FA-AN obtuvo los

valores más altos, aunque con cierta inestabilidad a lo largo del tiempo, atribuida a la microestructura heterogénea y porosa característica de la fabricación aditiva.

Figura 34.

Gráfico Rct Vs. Tiempo comparativo de las muestras REF y FA antes y después del proceso anodizado.



Nota: Elaboración propia

De acuerdo con los resultados de EIS, el proceso de anodizado incrementa la resistencia a la corrosión en REF como en FA, aunque la estabilidad de la capa protectora depende de la microestructura del material. Los valores de R_s y χ^2 fueron constantes y aceptables, validando el ajuste de todos los datos obtenidos. Adicionalmente, los resultados muestran que, pese a la mayor heterogeneidad microestructural del material FA, la capa anódica formada sobre estas muestras presenta un crecimiento más homogéneo y estable en comparación con la obtenida en las muestras de REF, lo que favorece su comportamiento electroquímico durante la exposición.

6 CONCLUSIONES

- La comparación entre las muestras de referencia y las de fabricación aditiva evidenció que las diferencias microestructurales afectan directamente en el comportamiento frente a la corrosión. Aunque las muestras FA presentan mayor variabilidad debido a la heterogeneidad y porosidad propia del proceso de fabricación, tras el anodizado desarrollan una capa más homogénea y estable que la formada en la muestra REF, mejorando su resistencia.
- El anodizado en H_2SO_4 demostró ser eficaz para mejorar la resistencia a la corrosión en la aleación de aluminio de referencia A356 y en las de fabricación aditiva AlSi10Mg. Sin embargo, la estabilidad y desempeño de la capa anódica dependen de la microestructura original del material y por los tratamientos térmicos posteriores aplicados.
- El análisis de rugosidad y mojabilidad confirmaron que el anodizado modifica la rugosidad superficial debido a la capa porosa depositada y, a su vez, disminuyó el ángulo de contacto, mostrando un cambio en la hidrofiliidad de las muestras.
- La capa anódica presentó una morfología porosa típica en ambas aleaciones, con diámetros de poro entre (20 y 40 nm) en el caso de FA. Aunque la microestructura de REF es más homogénea, las capas anódicas formadas sobre en FA resultaron más estables, especialmente en las tratadas térmicamente (HT). Asimismo, el anodizado incrementó la resistencia a la corrosión, confirmando su efectividad como método de modificación y protección superficial.
- Los ensayos de polarización y espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS), mostraron un desplazamiento de los potenciales hacia valores más nobles y un aumento considerado de la resistencia a la transferencia de carga (R_{ct}) tras el anodizado, confirman que el anodizado reduce la cinética de corrosión y mejora la estabilidad de las superficies frente al medio agresivo de NaCl.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alghamdi, F., Song, X., Hadadzadeh, A., Shalchi-Amirkhiz, B., Mohammadi, M., & Haghshenas, M. (2021). *Additive manufactured versus cast AlSi10Mg alloy: Microstructure and micromechanics*. ELSEVIER.
- Autodesk. (s.f.). Obtenido de <https://www.autodesk.es/solutions/3d-printing>
- Bárcena, M. M. (1997). *Pretratamientos Anticorrosivos No Contaminantes. Nuevos métodos basados en sales lantánidas*.
- Bourell, D. L., & Beamon, J. J. (2012). *The history of laser additive manufacturing*. LIA TODAY.
- Campuzano, R. G., & Mata Zamora, M. E. (8 de Julio de 2021). *Mundonano*. Obtenido de <http://www.mundonano.unam.mx/ojs/index.php/nano/article/view/69672/61898>
- Cirp.net. (s.f.). Obtenido de <https://www.cirp.net/images/cirpfichiers/annals/2003/2003-52-2-0589-E.pdf>.
- Conde, A., Gardon, M., G.A., R., Arenas, M. A., & de Damborenea, J. J. (2022). *Effect of growth orientation and heat treatment on the corrosion properties of AlSi10Mg alloy produced by additive manufacturing*. ELSEVIER.
- Durán, R. A. (2024). *Universidad Complutense*. Obtenido de <https://www.ucm.es/atlasmetalografico/a356-m>
- Fargeot, C., Dalmoro, V., Saunier, S., Schuster, F., & Harnisch, M. (2015). *Characterization of anodized aluminum oxide layers: Influence on surface roughness and wettability*. ELSEVIER.
- Fontana, M. G. (2005). *Corrosion Engineering*. McGraw-Hill.

formlabs. (s.f.). Obtenido de <https://formlabs.com/es/3d-printers/tech-compare/>.

García Vergara, S. J., Skeldon, P., Thompson, G., & Habakaki, H. (2007). *Pore development in anodic alumina in sulphuric acid and borax electrolytes*. ScienceDirect.

Haowen, Z., Jiawei, S., Youjie, G., Xuanxi, X., Yuchuan, H., Zhida, J., . . . Wencai, L. (2024). *Effects of post heat treatment on the microstructure and mechanical properties of selective laser melted AlSi10Mg alloys*. ELSEVIER.

Lipson, H., & Kurman, M. (February de 2013). *WILEY*. Obtenido de https://www.wiley.com/en-us/Fabricated%3A%2BThe%2BNew%2BWorld%2Bof%2B3D%2BPrinting-p-9781118350638?utm_source=chatgpt.com

Mukesh, A., David, B., Joseph , B., Harris Marcus, & Joel Barlow. (2015). *Direct selective lase sintering of metaal*. Emerald Insight.

Olakanmi, E. O., Cochrane, R. F., & Dalgarno, K. w. (2015). *A review on selective laser sintering/melting*. ScienceDirect.

OriginLab. (s.f.). Obtenido de <https://www.originlab.com>

Shen Lin, Z. (2022). *Estudio de la corrosión en soldaduras a tipe de aceros de alta resistencia mediante celdas microcapilares*.

Tiwari, A., Singh, G., & Jayaganthan, R. (7 de January de 2023). *Improved Corrosion Resistance Behaviour of AlSi10Mg Alloy due to Selective Laser Melting*. Obtenido de MDPI: <https://www.mdpi.com/2079-6412/13/2/225>

Walter, G. A. (1986). A review of impedance plot methods used for corrosion performance analysis of painted metal. En *Corrosion Science* (págs. Vol. 26, pág 681-703). Pergamon Journals Ltd.

ZView. (s.f.). Obtenido de <https://www.scribner.com/software/68-general-electrochemistr376-zview-for-windows/>

APÉNDICES

Apéndice A. Parámetros de deposición del proceso de fabricación aditiva SLM

En la Tabla A1 se presentan los parámetros de deposición y configuración utilizados en el proceso de impresión. Esta Tabla se incluyen variables que influyen directamente en la calidad y las propiedades microestructurales y superficiales de las piezas fabricadas.

Tabla A1

Variables utilizadas en el proceso SLM como para la obtención de las muestras de Fabricación Aditiva.

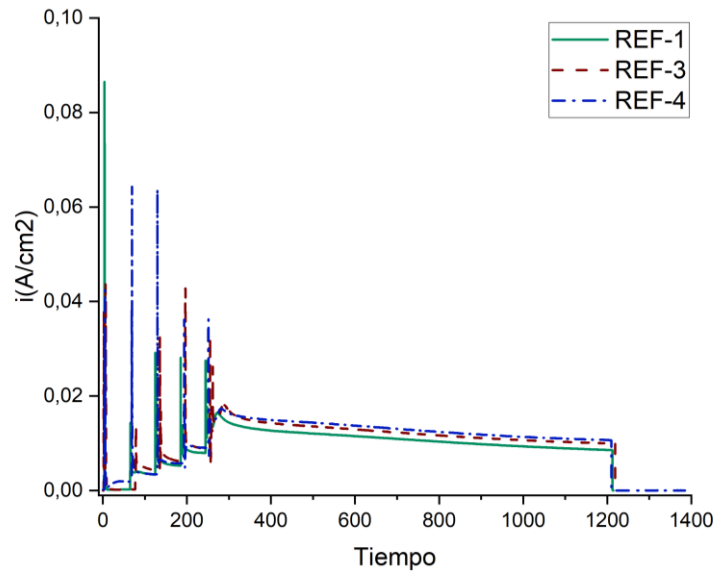
Parámetros de deposición de la fabricación aditiva

Altura de capa (μ)	25
Hatch power (W)	200
Hatch point distance (μ)	80
Hatch exposure time (ms)	140
Hatch exposure time (ms)	0.13
Scan strategy	stripe

Nota: Elaboración propia.

Apéndice B. Curvas de rampas de anodizado y criterios de aceptación**Figura B1**

Curvas de rampa de anodizado Tiempos Vs. i para las muestras de REF.

**Figura B2**

Curvas de rampa de anodizado Tiempos Vs. i para las muestras de FA. Nota: Elaboración propia.

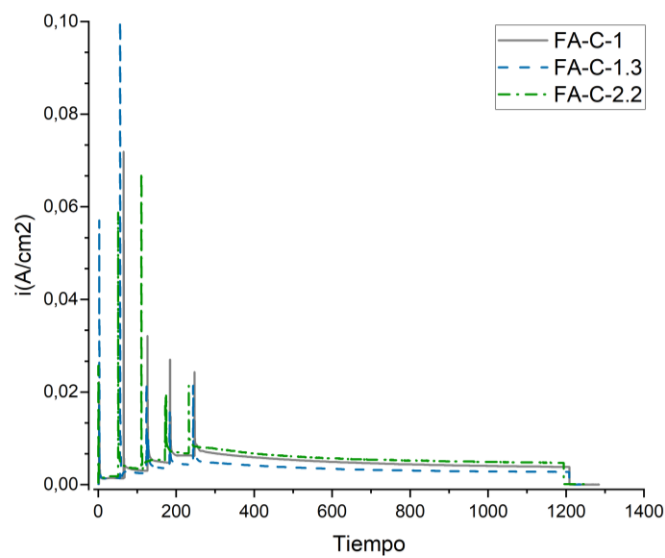


Figura B3

Curvas de rampa de anodizado Tiempos Vs. i para las muestras de FA-A-B.

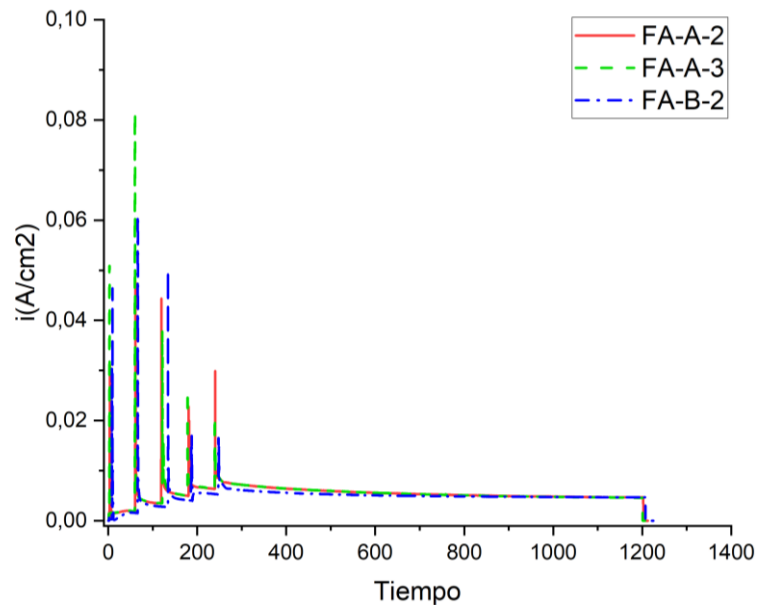
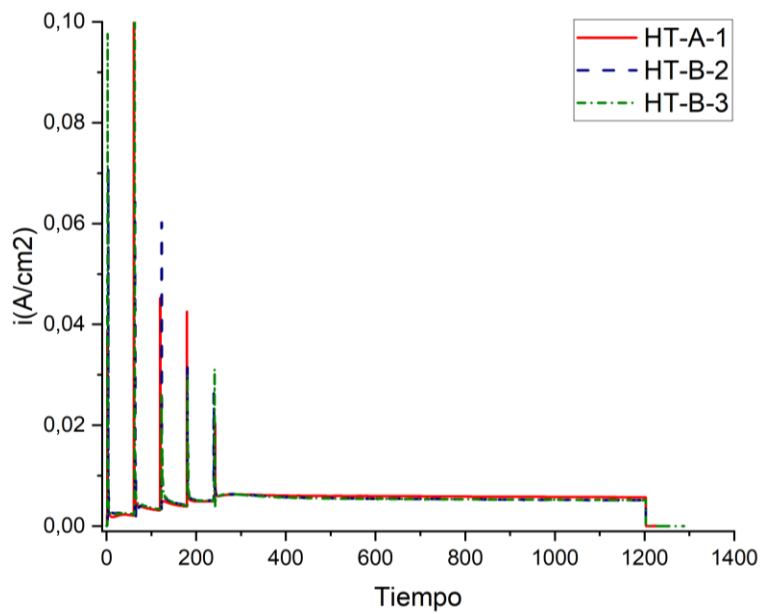


Figura B4

Curvas de rampa de anodizado Tiempos Vs. i para las muestras de HT-A-B.



Apéndice C. Datos complementarios de rugosidad y mojabilidad de las muestras REF y FA antes y después del anodizado.

Figura C1

Bloxpots comparativo de la rugosidad antes y después del anodizado para las muestras de REF.

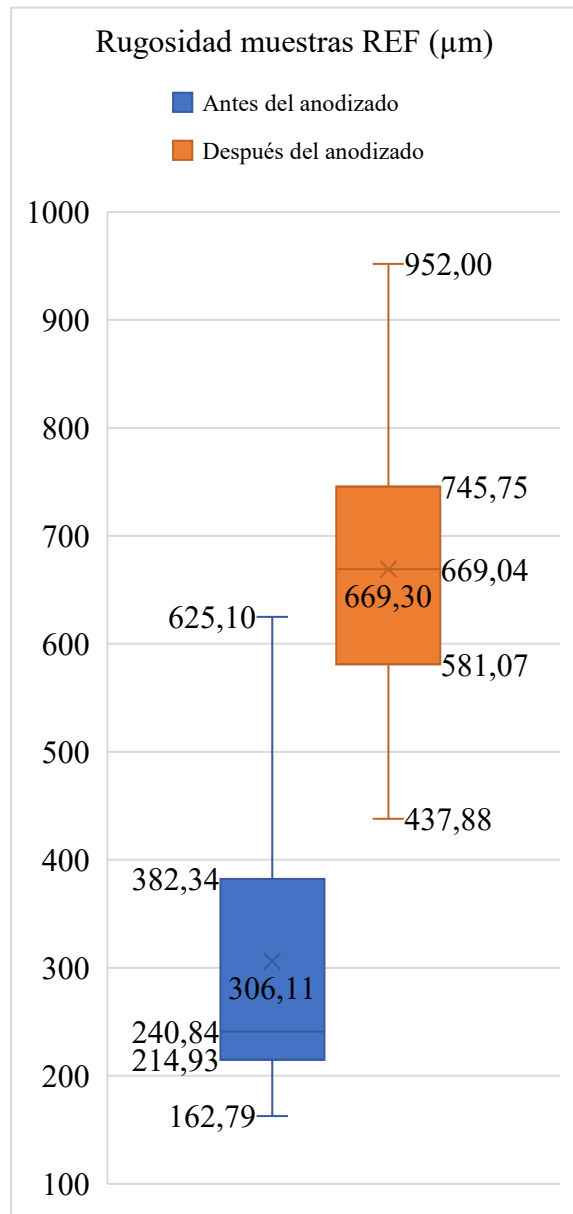


Figura C2

Bloxpots comparativo de la rugosidad antes y después del anodizado de las muestras de FA-C.

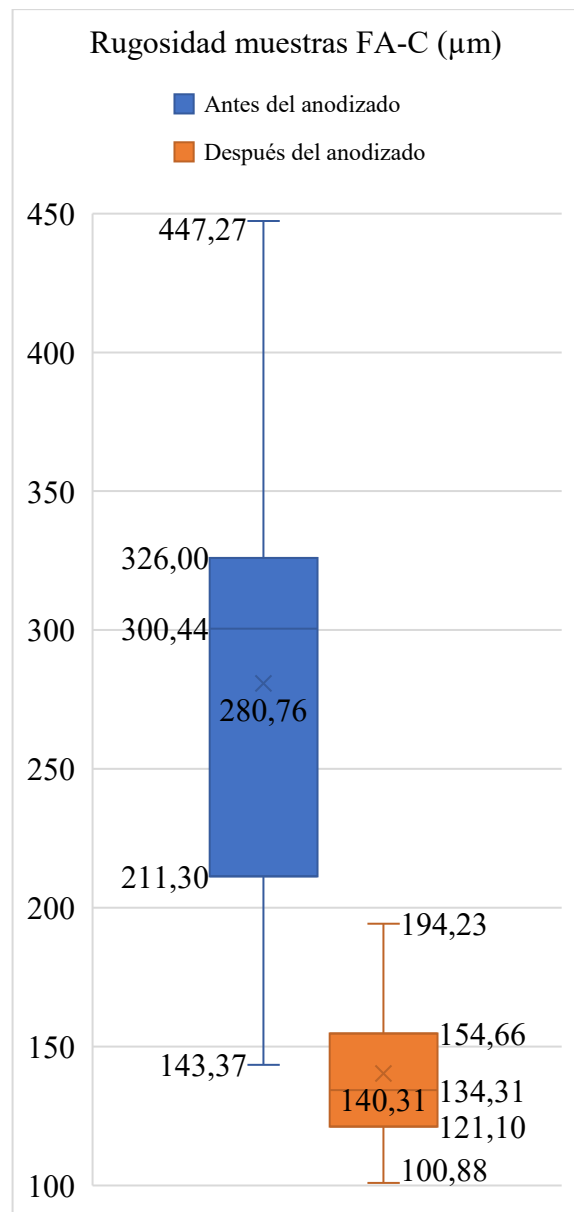


Figura C3

Bloxpots comparativo de la rugosidad antes y después del anodizado de las muestras de FA-A.

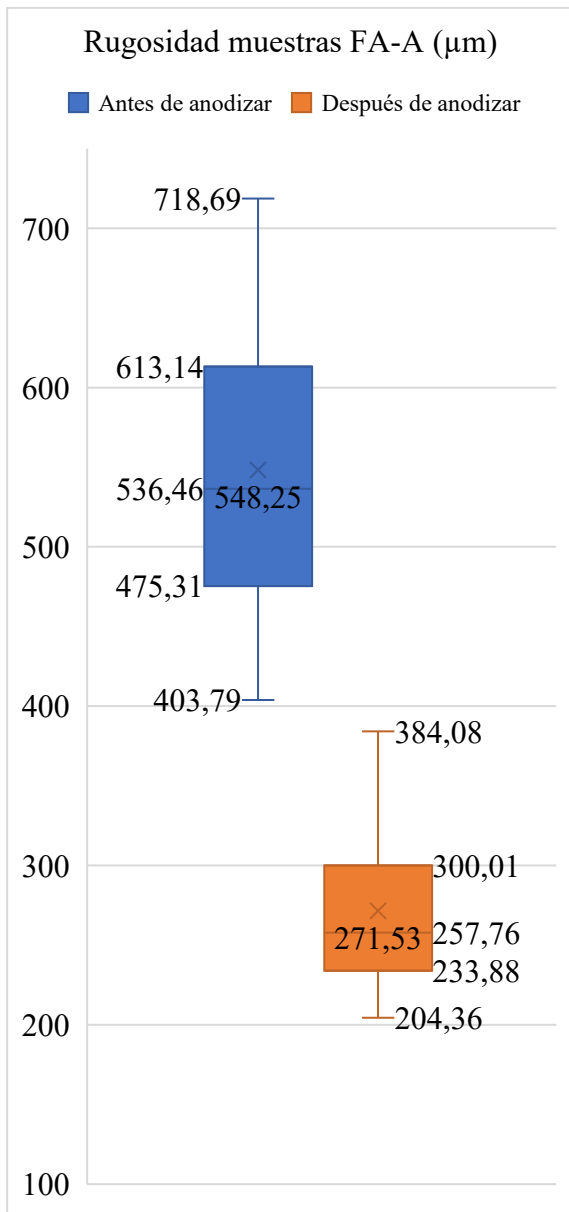


Figura C4

Bloxpots comparativo de la rugosidad antes y después del anodizado de las muestras de FA-B.

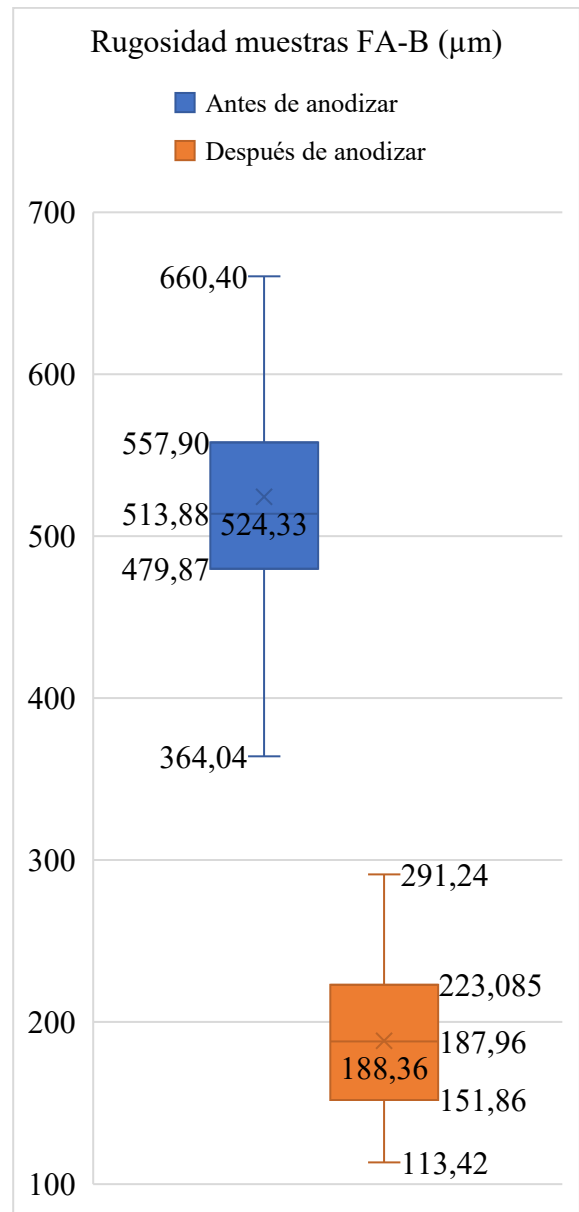


Figura C5

Bloxpots comparativo de la rugosidad antes y después del anodizado para las muestras HT-A.

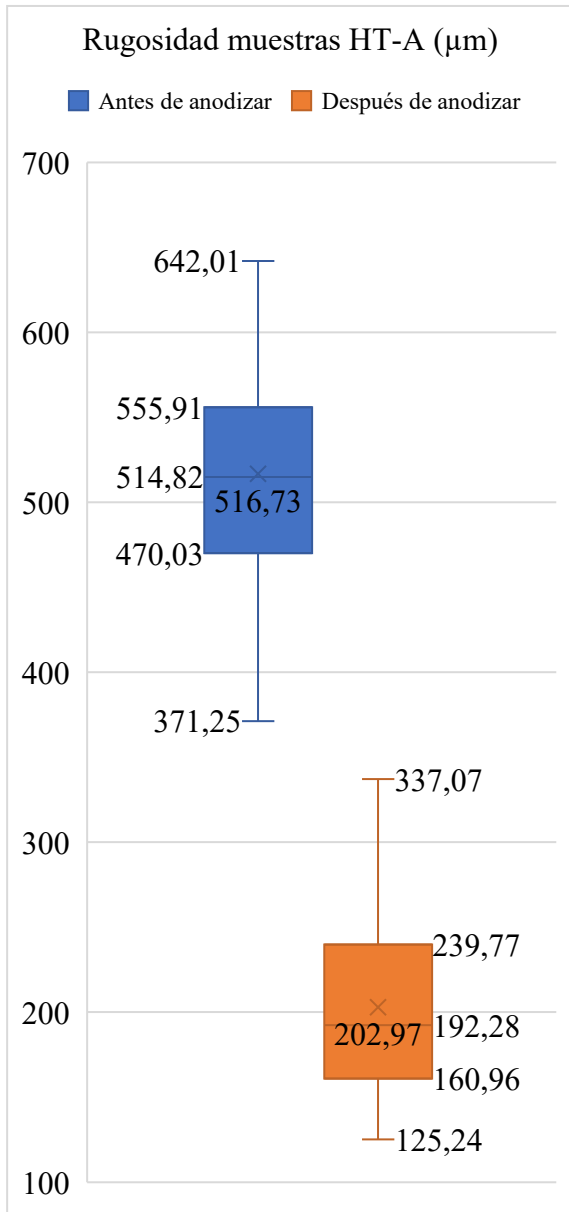


Figura C6

Bloxpots comparativo de la rugosidad antes y después del anodizado de las muestras de HT-B.

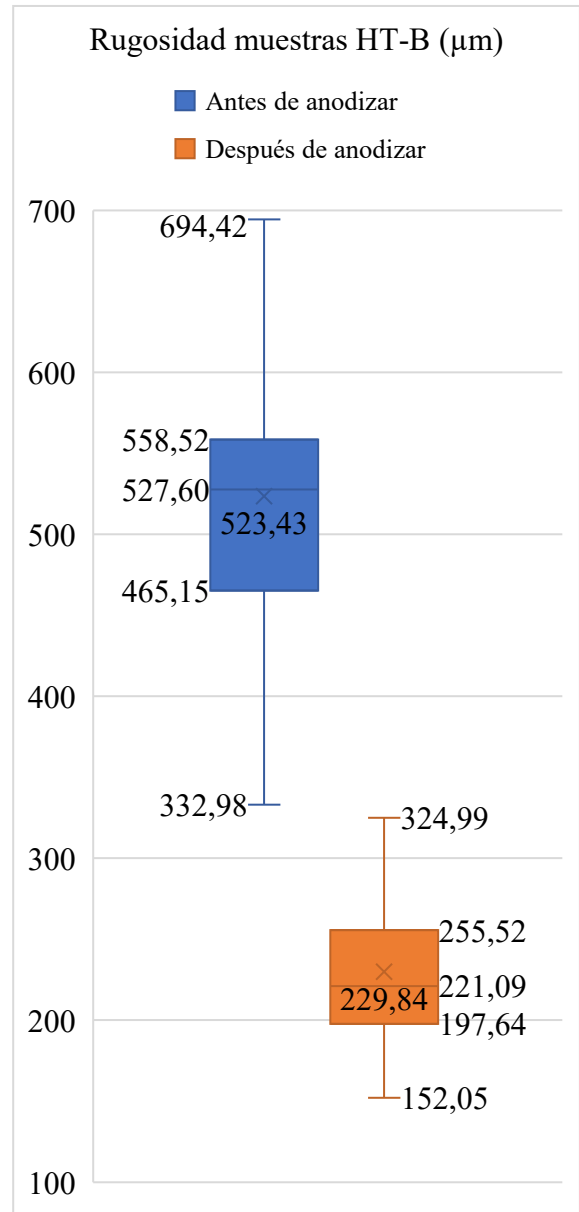
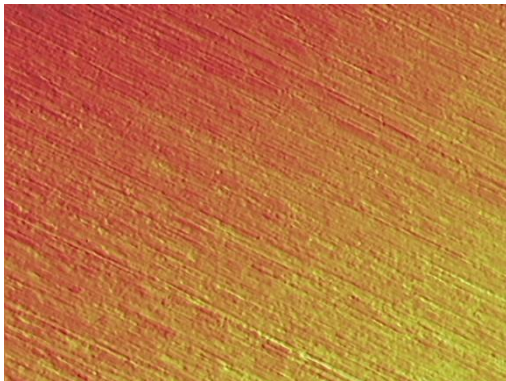
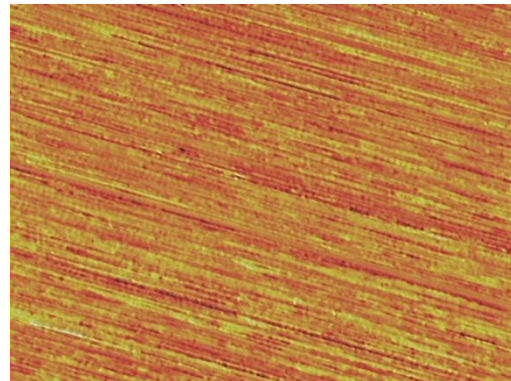


Figura C7

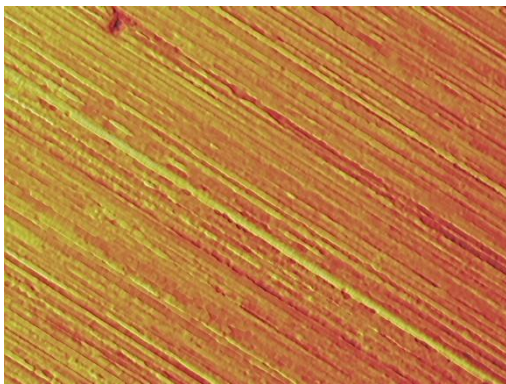
Topografía superficial de muestra REF a 1200X.

**Figura C8**

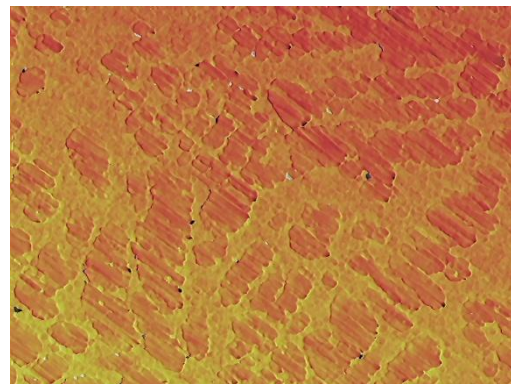
Topografía superficial de muestra FA-C a 1200X.

**Figura C9**

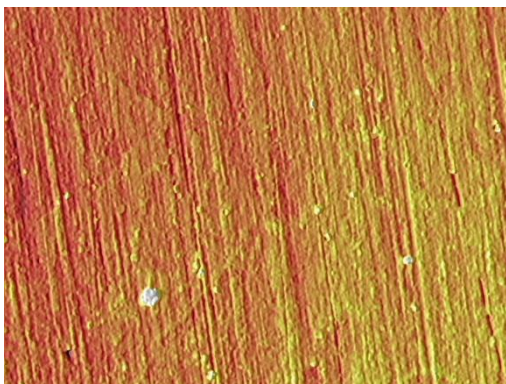
Topografía superficial de muestra FA-HT a 1200X.

**Figura C10**

Topografía de REF después de anodizar a 1200X

**Figura C11.**

Topografía de FA-C después de anodizar a 1200X.

**Figura C12**

Topografía de FA-HT tras anodizar a 1200X

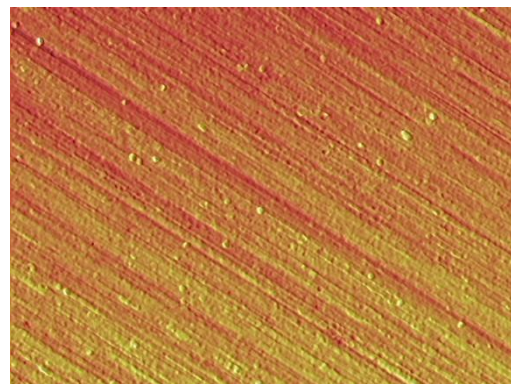


Figura C13

Bloxpots comparativo de la rugosidad antes y después del anodizado de las muestras de REF.

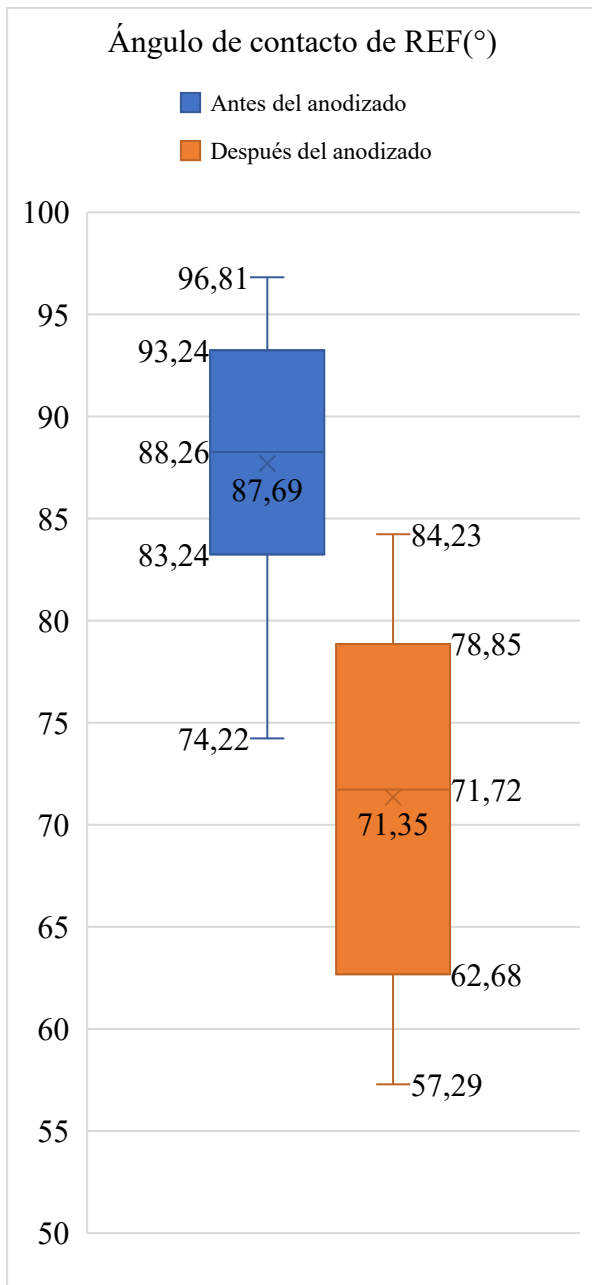


Figura C14

Bloxpots comparativo de la rugosidad antes y después del anodizado de las muestras de FA-C.

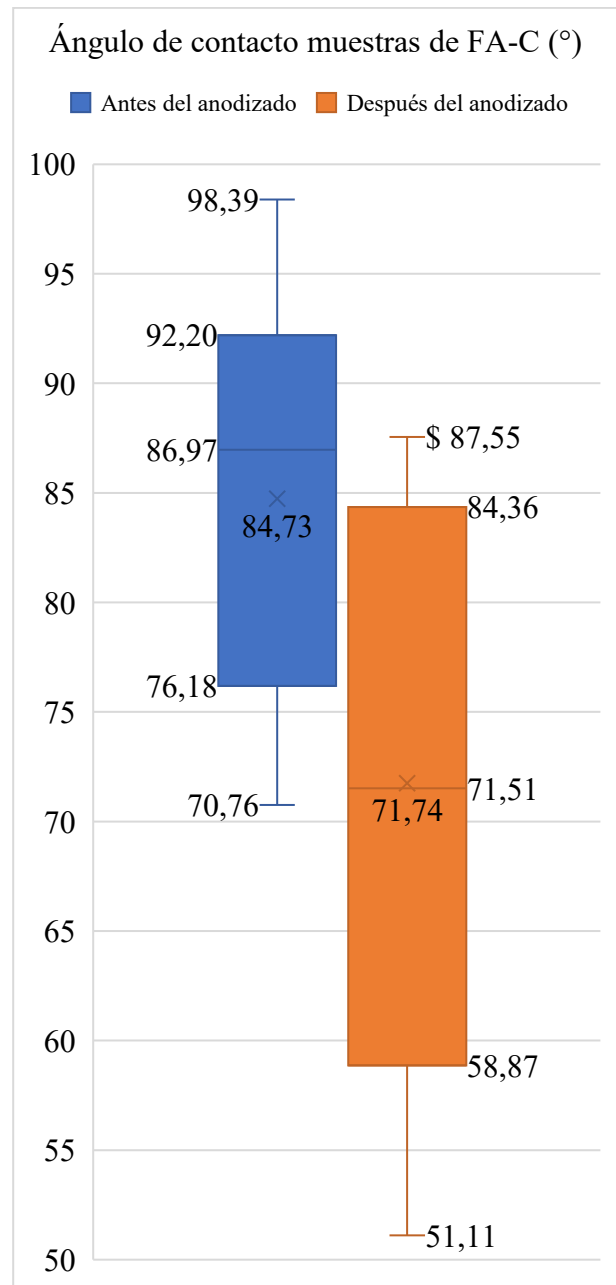


Figura C15

Bloxplots comparativo de la rugosidad antes y después del anodizado de las muestras de FA-A.

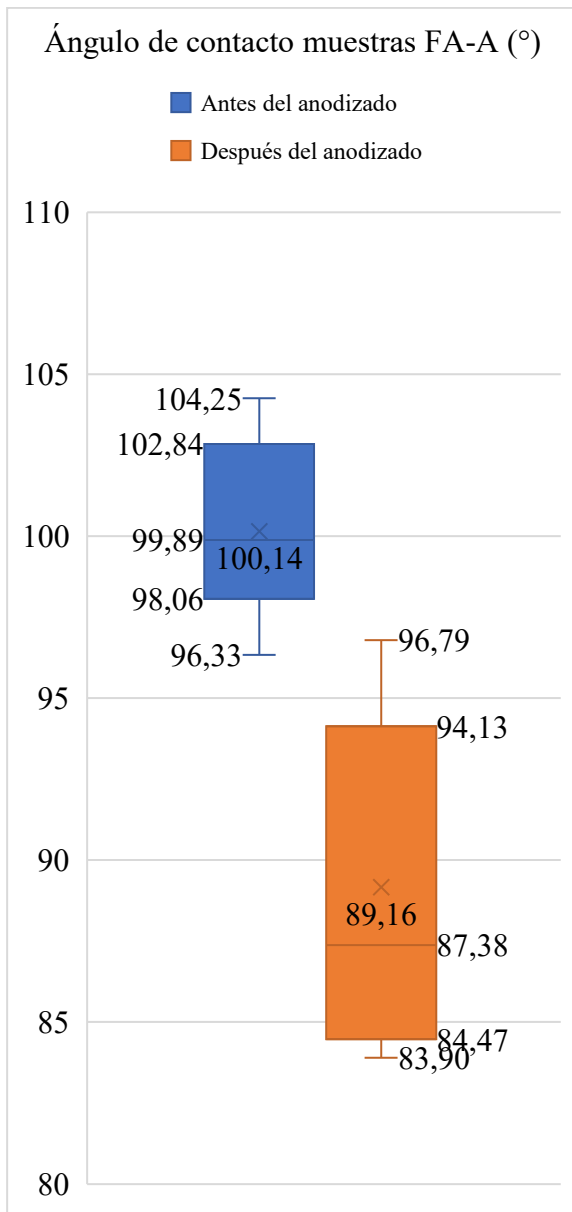


Figura C16

Bloxplots comparativo de la rugosidad antes y después del anodizado de las muestras de FA-B.

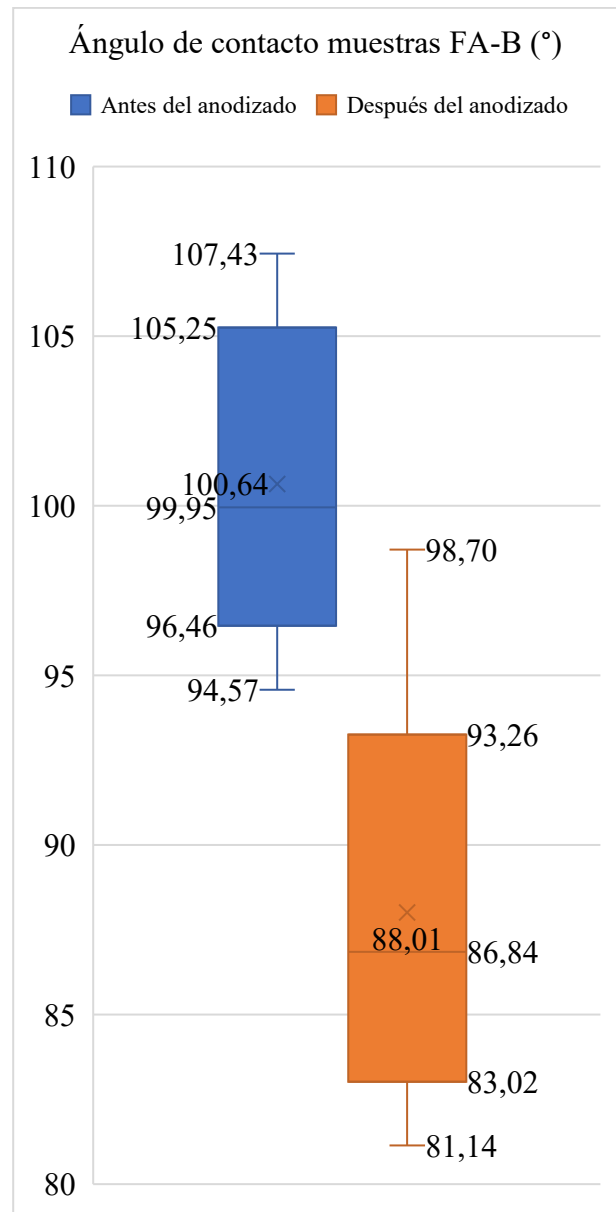


Figura C17

Bloxpots comparativo de la rugosidad antes y después del anodizado de las muestras de HT-A

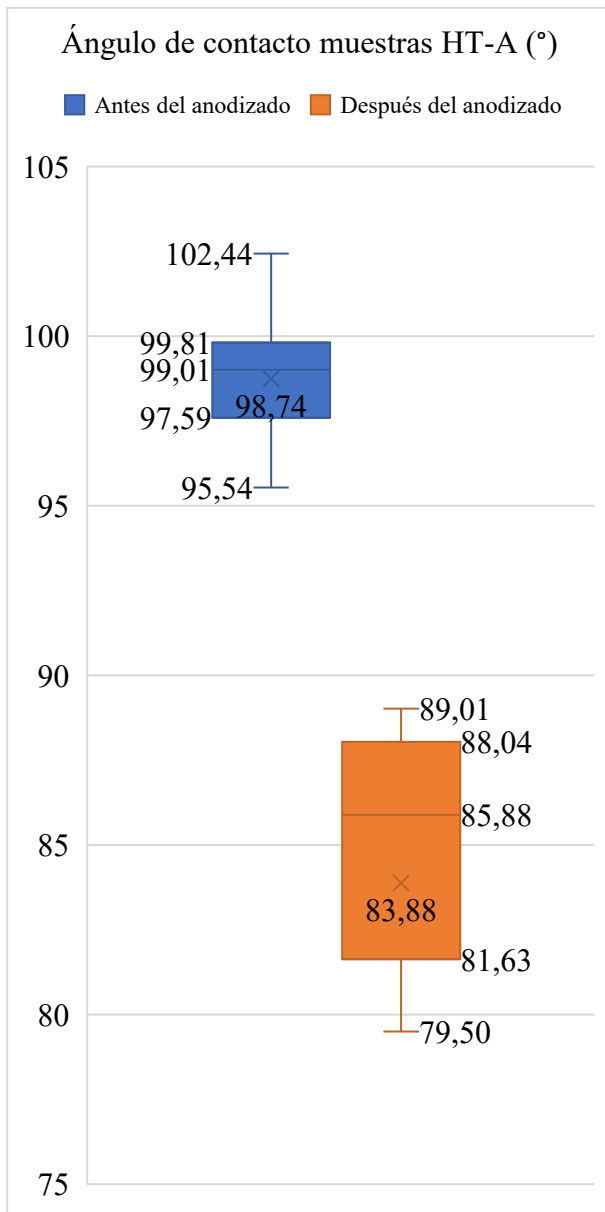
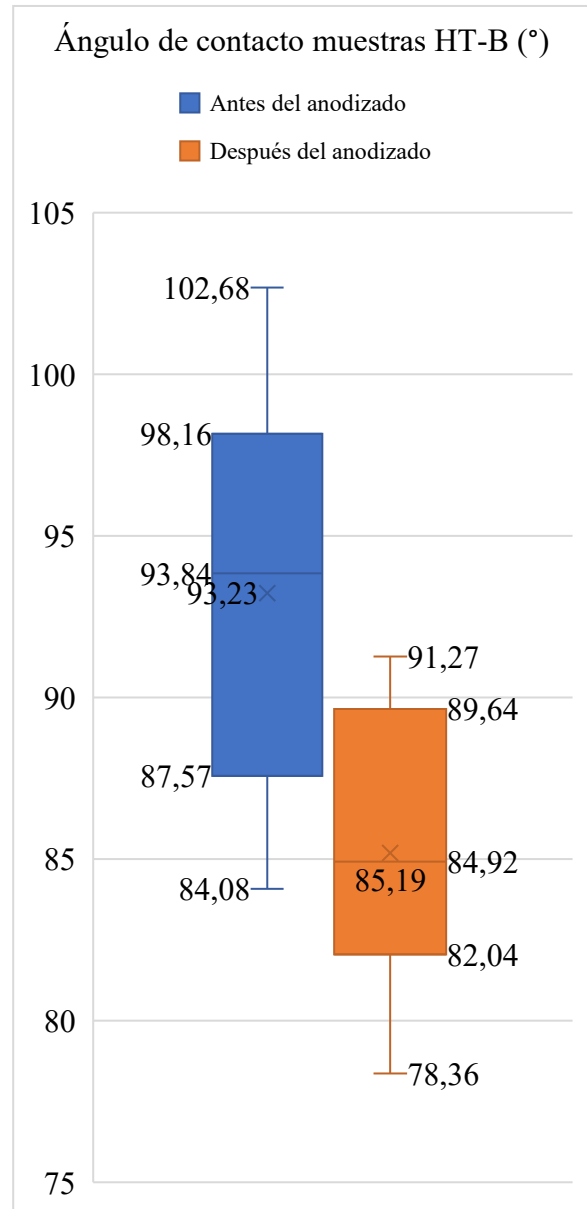


Figura C18

Bloxpots comparativo de la rugosidad antes y después del anodizado de las muestras de HT-B.



Apéndice D. Cálculos utilizados para obtener la velocidad de corrosión

A partir de estos valores y con la ecuación 9, se obtiene la velocidad de corrosión para cada sistema electroquímico

$$v_{\text{corr}} \text{ (mm/año)} = K \cdot \frac{i_{\text{corr}} \text{ (}\mu\text{A/cm}^2\text{)}}{\rho \text{ (g/cm}^3\text{)}} \cdot \text{EW} \quad (9)$$

Esta ecuación permite obtener una estimación de la pérdida de espesor del material por unidad de tiempo, donde K es una constante que reúne el cambio de unidades junto con la constante de Faraday:

$$K = \frac{365 \cdot 24 \cdot 3600}{96500} \cdot 10^{-5} = 3.27 \cdot 10^{-3} \text{ mm} \cdot \text{g} / (\mu\text{A} \cdot \text{cm} \cdot \text{año}) \quad (10)$$

EW corresponde al peso equivalente, donde:

$$\text{EW} = \frac{M(u)}{n \text{ (n}^{\circ} \text{ e}^{-}\text{)}} \quad (11)$$

Dado que las aleaciones estudiadas están compuestas mayormente por una matriz de Al, la masa M y la densidad ρ que se emplearon en los cálculos corresponden a este elemento. Teniendo en cuenta la oxidación del aluminio Al a Al^{3+}

$$\text{EW} = \frac{27}{3} = 9 \frac{u}{e^{-}}$$

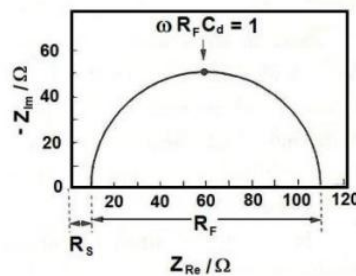
$$\rho = 2,7 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

Apéndice E. Circuitos equivalentes utilizados en la simulación de impedancias

Entre las representaciones más comunes para representar los datos de impedancias se encuentran los diagramas de Bode y Nyquist, revelando información sobre el proceso corrosivo presente en el sistema. En la Figura E1 se observa un diagrama de Nyquist, conformado por plano imaginario y una parte de real de la impedancia en un rango de frecuencias determinado. En los diagramas de Bode (Figura E2), se encuentra una doble representación: un diagrama con el módulo de la impedancia contra la frecuencia en escalas logarítmicas y el otro es el diagrama de la frecuencia con el ángulo de fase.

Figura E1

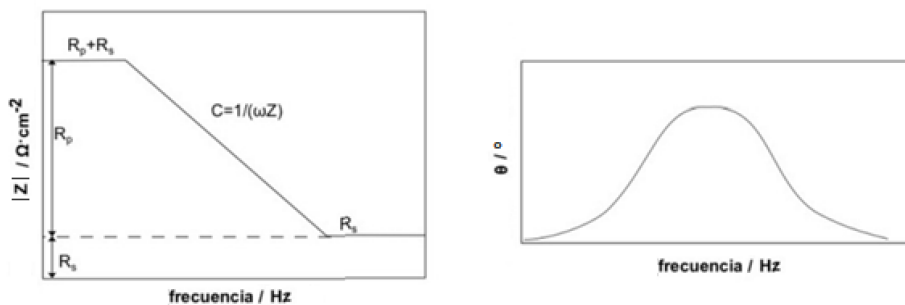
Ejemplo de diagrama de Nyquist.



Nota: Tomado de (*OriginLab, s.f.*)

Figura E2

Ejemplo del diagrama de bode-modulo y bode-ángulo de fase.

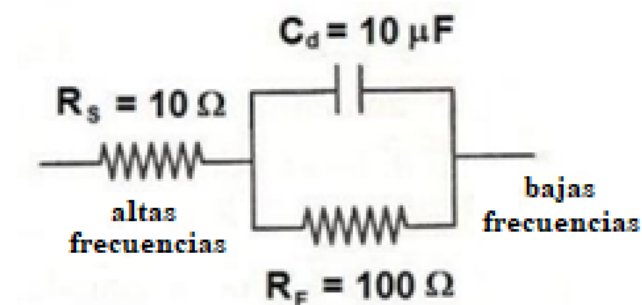


Nota: Tomado de (*Walter, 1986*)

De acuerdo con los diagramas ejemplo en las Figuras E1 y E2, un circuito equivalente sencillo que representa el comportamiento electroquímico de este sistema se muestra en la Figura E3. Este circuito está compuesto por una resistencia faradaica R_F , en paralelo con una capacidad asociada a la doble capa C_d y ambos en serie con la resistencia del electrolito R_s .

Figura E3

Circuito equivalente que simula el comportamiento del sistema recogido en las figuras 55 y 56.



Nota: Tomado de (ZView, s.f.)

Para establecer los circuitos equivalentes que simulan el comportamiento en las muestras, se obtuvieron algunos valores de las gráficas experimentales. En los tiempos cortos de inmersión, el diagrama de ángulo de fase en la representación de Bode presenta un máximo de frecuencia se observa un máximo f_{\max} , relacionado a una constante de tiempo característica del sistema y el módulo de la impedancia correspondiente a dicha frecuencia obtenido del diagrama de bode de modulo. Con estos valores calculó la capacitancia presente en la superficie del aluminio, según la ecuación:

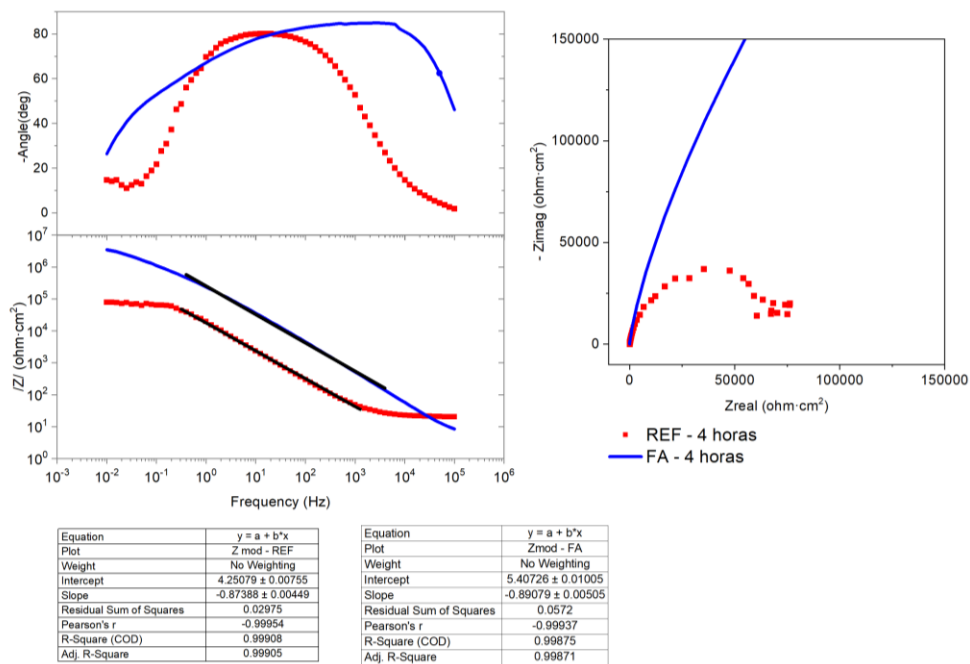
$$C_T (\mu F \cdot \text{cm}^{-2}) = \frac{1}{2\pi f_{\max} |Z|_{\text{norm}}} \quad (11)$$

$$|Z|_{\text{norm}} = |Z| \times A$$

Para tiempos de inmersión de 4 horas, las muestra REF y FA, tienen capacitancias de 6,59 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$ y 0.367 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$, respectivamente, valores obtenidos a partir del módulo de la impedancia normalizado por el área del electrodo. Estas capacitancias se asocian con la capacidad de la doble capa electroquímica. En la Figura E4 se muestra como el diámetro del semicírculo en el diagrama de Nyquist es mayor en el caso de FA, indicando una mayor resistencia a la transferencia de carga. Asimismo, en el diagrama de modulo, FA tiene valores del módulo de la impedancia mayores a frecuencias bajas que la muestra REF, sugiriendo una mayor resistencia frente a la corrosión en comparación con REF.

Figura E4

Comparativa de los diagramas de EIS de las muestras de REF y FA sin anodizar durante las 4 horas de inmersión en NaCl 0,6M



Nota: elaboración propia.

Apéndice F. Tablas completas de parámetros electroquímicos

Tabla F1

Valores obtenidos de la simulación de la muestra REF en NaCl 0.6M tras 30 días de inmersión.

REF	0 horas		4 horas		24 horas		48 horas	
	Valor	% Error	Valor	% Error	Valor	% Error	Valor	% Error
Rs ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	32,1	4,82	22,3	9,16	35,2	2,14	12,2	2,75
Rct ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	1,26E+05	7,83	7,88E+04	2,76	2,36E+05	3,18	5,29E+04	3,57
CPE-T ($\text{S} \cdot \text{s}^{\text{p}}$)	2,51E-05	2,87	3,10E-05	1,91	3,35E-05	2,4	4,20E-05	2,52
CPE-P	0,9217	1,06	0,904	0,37	0,907	0,48	0,9	0,47
χ^2	0,039319		0,0043173		0,0064472		0,0073064	

72 horas		96 horas		15 días		22 días		30 días	
Valor	% Error	Valor	% Error	Valor	% Error	Valor	% Error	Valor	% Error
14	1,86	13,3	1,28	22,4	1,96	18,6	4,92	28,2	2,78
4,04E+04	2,57	4,73E+04	2	4,08E+04	4,4	7,54E+04	13,46	6,80E+04	7,22
4,94E-05	1,96	5,60E-05	1,32	9,70E-05	2,29	8,80E-05	4,54	7,40E-05	3,09
0,906	0,38	0,905	0,26	0,9	0,52	0,872	1,04	0,895	0,7
0,0041999		0,0021193		0,0076651		0,032514		0,014862	

Nota: Elaboración propia.

Tabla F2

Valores obtenidos de la simulación de REF anodizada en H_2SO_4 tras 22 días de inmersión en NaCl 0.6M.

REF-AN	0 horas		24 horas		144 horas		144 horas	
	Valor	% Error	Valor	% Error	Valor	% Error	Valor	% Error
Rs ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	11,7	9,68	11,8	8,3	20,9	6,15	23,4	4,12
Rct ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	6,40E+05	3,89	2,92E+05	2,71	1,14E+05	3,07	8,84E+04	2,2
CPE-T ($\text{S} \cdot \text{s}^{\text{p}}$)	4,18E-06	2,33	5,13E-06	2,27	6,17E-06	3,63	7,00E-06	1,23

CPE-P	0,878	0,37	0,862	0,37	0,873	0,57	0,865	0,48
χ^2	0,007485		0,000523214		0,0098061		0,0056305	

8 días		22 días	
Valor	% Error	Valor	% Error
21	5,86	11	3,04
8,25E+04	3,27	2,46E+04	3,13
7,41E-06	1,77	2,16E-05	2,09
0,87	0,68	0,915	0,89
0,011967		0,014981	

Nota: Elaboración propia

Tabla F3

Valores obtenidos de la simulación de la muestra FA tras 30 días de inmersión en NaCl 0.6M.

FA	24 horas		72 horas		96 horas		8 días	
	Valor	% Error	Valor	% Error	Valor	% Error	Valor	% Error
Rs ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	10	-	20,98	7,51	25,02	3,27	16,11	2,26
Rct ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	5,43E+06	4,54	1,01E+05	3,1	5,89E+04	2,78	3,36E+04	2,64
CPE-T ($\text{S} \cdot \text{s}^{\text{p}}$)	3,44E-07	2,7	2,70E-06	4,62	7,90E-06	3,38	2,60E-05	2,47
CPE-P	0,92069	0,42	0,89452	0,69	0,9024	0,57	0,89056	0,47
χ^2	0,017038		0,014624		0,008401		0,0053313	

16 días		22 días		30 días	
Valor	% Error	Valor	% Error	Valor	% Error
19,33	1,58	16,74	1,92	18,97	1,68
2,46E+04	3,29	1,11E+04	4,05	1,50E+04	4,82
8,29E-05	2,08	0,00016	2,91	0,0002	2,45
0,90119	0,48	0,91848	0,72	0,93657	0,66
0,00564		0,011932		0,012678	

Nota: Elaboración propia

Tabla F4

Valores obtenidos de la simulación de la muestra FA anodizada en H₂SO₄ tras 22 días de inmersión en NaCl 0.6M.

FA-AN	0 horas		4 horas		24 horas		48 horas	
	Valor	% Error	Valor	% Error	Valor	% Error	Valor	% Error
Rs ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	3,32	7,53	2,24	9,09	2,99	8,35	2,09	2,75
Rct ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	5,62E+05	11,77	1,90E+05	11,34	1,19E+05	8,15	9,10E+03	3,57
CPE-T (S·s^p)	7,16E-06	1,35	9,25E-06	15193	9,82E-06	1,5	4,20E-05	2,52
CPE-P	0,84917	0,45	0,836	0,51	0,81	0,55	0,9	0,47
χ^2	0,009521		0,011421		0,0095156		0,0073064	

72 horas		96 horas		8 días		15 días		22 días	
Valor	% Error	Valor	% Error	Valor	% Error	Valor	% Error	Valor	% Error
4,12	7,19	6,72	6,11	12,78	3,85	9,61	1,61	6,64	1,26
7,21E+04	5,81	3,62E+04	4,89	9,95E+03	4,04	3,12E+03	2,28	2,32E+03	2,67
1,05E-05	1,43	1,13E-05	1,72	1,67E-05	2,2	5,09E-05	2,79	0,00017	2,09
0,785	0,57	0,779	0,75	0,815	1,05	0,904	0,6	0,944	0,53
0,0074368		0,0094854		0,013215		0,0059138		0,0071826	

Nota: Elaboración propia