

Anodizado de Aleaciones Ligeras.

Ashlly Nayara Rangel Hernández

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniera Metalúrgica

Directora

Sandra Judith García Vergara

Ingeniera Metalúrgica, Universidad Industrial de Santander

PhD Corrosion Science and Engineering, University of Manchester, UK

Codirectora

María Ángeles Arenas Vara

Doctora en Materiales, Universidad Complutense de Madrid

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Ingeniería Metalúrgica

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

Dedico este trabajo, ante todo, a mi familia, por ser mi mayor fuente de apoyo, paciencia y amor incondicional. Gracias por acompañarme en cada etapa de este camino, por creer en mí incluso en los momentos de duda y por recordarme siempre que los sueños se alcanzan con esfuerzo y constancia.

Dedico también esta tesis a mis amigos más cercanos. En especial a Nasarallah, quien ha sido mi compañera de aventuras y ha recorrido conmigo cada etapa de este camino. Aun cuando el proceso fue difícil en muchos aspectos para ambas, nunca me dejó sola y siempre se aseguró de que siguiéramos adelante sin importar las circunstancias. Gracias por acompañarme, por compartir la experiencia de estar lejos de casa por primera vez, donde crecimos, aprendimos y enfrentamos nuevos retos juntas.

Y a Ángel, quien estuvo a mi lado cuando más lo necesité, con quien compartí gustos, ideas y conversaciones interminables que hicieron más ligeros los días más exigentes.

A todos mis amigos, gracias por su amistad sincera, por las risas que aliviaron los momentos de tensión y por estar presentes en cada paso importante. Su apoyo, lealtad y confianza en mí hicieron que este proceso fuera más significativo. Este logro también lleva una parte de ustedes.

También dedico esta tesis a todas las personas que, de una u otra manera, me impulsaron a seguir adelante, a no rendirme ante las dificultades y a confiar en mis capacidades. Este logro no es solo mío, sino de todos quienes caminaron conmigo en este proceso.

Agradecimientos

A mi directora de tesis, Dra. Sandra Vergara, expreso mi más sincero agradecimiento por su orientación, compromiso y acompañamiento constante a lo largo de este proyecto. Su disposición para escuchar, su criterio académico y su exigencia profesional fueron fundamentales para dar forma y solidez a este trabajo. Gracias por su paciencia, por cada corrección y por motivarme siempre a dar lo mejor de mí.

A mi codirectora, Dra. Geles Arenas, desde España, le agradezco profundamente por compartir su conocimiento, su experiencia y su tiempo, aun a la distancia. Su apoyo, observaciones y visión crítica enriquecieron significativamente esta investigación. Ha sido un honor contar con su guía y su confianza en este proceso.

Agradezco también a los docentes, compañeros y amigos que aportaron con sugerencias, conversaciones y ánimo durante el desarrollo de este trabajo. Cada palabra de aliento hizo la diferencia en los momentos más retadores.

Finalmente, agradezco a Dios y a la vida por permitirme culminar esta etapa, y por brindarme la fortaleza necesaria para alcanzar este objetivo académico que marca un paso importante en mi crecimiento personal y profesional.

Tabla de Contenido

1.	Introducción	12
2.	Objetivos	13
2.1.	Objetivo general	13
2.2.	Objetivos específicos	13
3.	Fundamentación teórica	14
3.1.	Patógenos	14
3.2.	Virus y bacterias nosocomiales.....	14
3.3.	El flúor como agente antibacteriano	15
3.4.	El anodizado.....	16
4.	Metodología	17
4.1.	Material	17
4.2.	Desbaste	17
4.3.	Limpieza alcalina y decapado ácido	17
4.4.	Montaje de la muestra.....	19
4.5.	Proceso de anodizado.....	19
4.5.1.	Preparación del electrolito	19
4.5.2.	Condiciones del anodizado	20
4.5.3.	Postratamiento.....	21
4.6.	Caracterización de las capas anódicas	21
4.6.1.	Ángulo de contacto	21
4.6.2.	Rugosidad superficial.....	22
5.	Resultados y Discusión.....	23

5.1.	Anodizado	23
5.2.	Ángulo de contacto	25
5.3.	Rugosidad superficial.....	27
5.4.	Estudio microestructural	29
5.5.	Caracterización electroquímica.....	31
5.5.1.	Curvas de polarización.....	31
5.5.2.	Curvas de polarización después del anodizado.....	36
5.5.3	Comparación entre la aleación antes y después del proceso de anodizado	39
5.5.4	Evaluación de la respuesta electroquímica mediante espectroscopía de impedancia (EIS)	40
5.6	Ensayo de adherencia bacteriana en superficies anodizadas con incorporación de fluoruro	50
6	Conclusiones	51
7	Referencias Bibliográficas	52
8	Apéndices.....	56

Lista de tablas

Tabla 1. Composición química del aluminio 6063 T5 (% en peso).....	17
Tabla 2. Condiciones de anodizado	20
Tabla 3. Datos de rugosidad tomados antes de realizar el proceso de anodizado.	27
Tabla 4. Datos de rugosidad tomados después de realizar el proceso de anodizado.	28
Tabla 5. Parámetros electroquímicos obtenidos a partir de la extrapolación de curvas de Tafel antes del proceso de anodizado	35
Tabla 6. Parámetros electroquímicos obtenidos a partir de la extrapolación de curvas de Tafel después del proceso de anodizado.	38
Tabla 7. Resumen de los principales parámetros electroquímicos obtenidos por la extrapolación de Tafel antes y después del tratamiento de anodizado	39

Lista de Figuras

Figura 1. Micrografía SEM de la superficie del aluminio AA 6063-T5 tras el tratamiento de limpieza alcalina y decapado ácido.....	19
Figura 2. Medición del ángulo de contacto mediante el equipo Theta Attension optical tensiometer (KSV Instruments).....	22
Figura 3. Evolución de la densidad de corriente en función del tiempo durante el proceso de anodizado.....	24
Figura 4. Valores del ángulo de contacto antes y después del proceso de anodizado.....	26
Figura 5. Caracterización Morfológica Superficial mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).....	30
Figura 6. Corte transversal de la capa anódica sobre aluminio AA 6063-T5 analizado mediante SEM-EDS tras el proceso de anodizado.....	31
Figura 7. Curvas de polarización potenciodinámica antes del anodizado.....	33
Figura 8. Ajuste de regiones Tafel anódica antes del anodizado.....	34
Figura 9. Curvas de polarización potenciodinámica después del anodizado.....	36
Figura 10. Ajuste de regiones Tafel anódica después del anodizado.....	37
Figura 11. Variación de la impedancia a baja frecuencias en función del tiempo de inmersión de muestras sin anodizar.....	41
Figura 12. Variación de la impedancia a baja frecuencias en función del tiempo de inmersión después del proceso de anodizado.....	43
Figura 13. Circuito equivalente.....	45
Figura 14. Diagrama de Bode y Nyquist antes del proceso de anodizado.....	46
Figura 15. Circuito equivalente.....	48

Figura 16. Diagramas de Bode y Nyquist después del anodizado..... 49

Lista de apéndices

Apéndice A. Parámetros de rugosidad antes y después del proceso de anodizado	56
Apéndice B. Diagrama de Bode y Nyquist obtenidos en función del tiempo antes del proceso de anodizado	56
Apéndice C. Diagrama de Bode y Nyquist obtenidos en función del tiempo después del proceso de anodizado	58
Apéndice D. Parámetros electroquímicos obtenidos antes del proceso de anodizado	60
Apéndice E. Parámetros electroquímicos obtenidos después del proceso de anodizado	61

Resumen

Título: Anodizado de aleaciones ligeras ¹

Autor: Ashly Nayara Rangel Hernández ²

Palabras Clave: Antimicrobianas, anodizado aleaciones de aluminio, modificación superficial.

Descripción: En las últimas décadas, la pandemia originada por el COVID-19, los virus nosocomiales y el aumento en la resistencia a los antibióticos convencionales ha generado una gran preocupación en el sector hospitalario lo que ha originado el aumento de las investigaciones enfocadas en el desarrollo de estrategias que ayuden a la prevención de la transmisión de virus/bacterias por contacto directo con superficies. En la bibliografía científica se ha publicado que las microgotas de saliva infectadas son capaces de adherirse al polvo en suspensión y acabar depositadas sobre la superficie de manillas y pomos, llegando a tener un tiempo de vida en la superficie de algunos metales de 5 a 9 días a temperatura ambiente. Como es ampliamente conocido, el flúor está presente en pastas dentales debido a que inhibe la actividad bacteriana; es decir, funciona como agente antiséptico. En este trabajo, se pretende funcionalizar la aleación de aluminio AA 6063 mediante anodizado, teniendo como objetivo dotar a la superficie con propiedades antimicrobianas por la incorporación de iones de flúor en la capa anódica. Esta aleación se selecciona por sus excelentes propiedades y sus aplicaciones estructurales, en particular, en el sector de mobiliario urbana.

¹ Trabajo de Grado

² Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Director Sandra Judith García Vergara. PhD Corrosion Science and Engineering, Codirector: Dra María Ángeles Arenas Vara

Abstract

Title: Anodizing of light alloys.³

Author(s): Ashlly Nayara Rangel Hernández⁴

Key Words: Antimicrobial, anodized aluminum alloys, anodized aluminum alloys.

Description: In recent decades, the pandemic caused by COVID-19, nosocomial viruses and the increase in resistance to conventional antibiotics has generated great concern on the part of the hospital sector, thus producing a high demand for research into alternative strategies to help prevent the transmission of viruses/bacteria by direct contact with surfaces. It has been published in the scientific literature that infected saliva droplets are able to adhere to dust in suspension and end up deposited on the surface of handles and knobs, in addition to having a lifetime on the surface of some metals of 5 to 9 days at room temperature. In view of the fact that the function of fluoride in toothpastes is widely recognized due to the fact that it inhibits bacterial activity; that is to say, it works as an antiseptic agent. In this work, it is intended to functionalize the aluminum alloy AA 6063 by means of anodizing as a surface treatment with the objective of providing the surface with antimicrobial properties through the incorporation of fluoride ions in the anodic layer. This alloy was selected for its excellent properties and structural applications, particularly in the street furniture sector.

³ Thesis.

⁴ Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Director Sandra Judith García Vergara. PhD Corrosion Science and Engineering, Codirector: Dr. María Ángeles Arenas Vara

1. Introducción

En los últimos años, el estilo de vida de la humanidad ha experimentado cambios drásticos con la llegada de la pandemia ocasionada por el COVID-19, circunstancia que ha desembocado en un elevado número de fallecimientos por enfermedades respiratorias asociadas a la infección vírica del SARS-CoV-2. Las principales fuentes de contagio incluyen las microgotas de saliva infectada con el virus que se depositan sobre la superficie de los materiales que nos rodean. Esto sucede de manera repetitiva cada vez que una persona exhala, estableciéndose que las superficies contaminadas son una ruta de transmisión de importantes patógenos nosocomiales, incluyendo la bacteria *Staphylococcus aureus* (MRSA) resistente a la meticilina, los enterococos resistentes a la vancomicina (VRE), norovirus, que comparten la capacidad de sobrevivir largos periodos sobre las superficies inanimadas. Por ello, es importante el uso del tapabocas para prevenir la propagación de dichas enfermedades.

En el presente trabajo de investigación se pretende evaluar un tratamiento superficial aplicado a aleaciones de aluminio con el fin de dotar a la superficie de nuevas funcionalidades. Entre todas las aleaciones de aluminio, se ha elegido una aleación de la serie 6000, en específico, la aleación de aluminio AA 6063, por sus aplicaciones estructurales en diferentes sectores que comprenden desde el automovilístico, aeroespacial hasta el arquitectónico. Esta aleación se caracteriza por presentar una baja densidad, buena conducción térmica y resistencia a la corrosión. Por todas las características mencionadas, su uso se extiende a aspectos funcionales como mobiliario urbano (manillas, pomos, asideros, etc.). Debido al papel crucial que juegan las superficies en la transmisión de enfermedades originadas con diferentes patógenos, en el presente trabajo se llevará a cabo un tratamiento de modificación superficial sobre la aleación de aluminio AA 6063 para evaluar si dotan a la superficie con propiedades antimicrobianas.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Desarrollar capas anódicas con flúor en aleaciones de aluminio.

2.2. Objetivos específicos

- Modificar de manera superficial la aleación AA 6063 mediante el proceso de anodizado.
- Caracterizar electroquímicamente en soluciones que simulan el sudor de las manos.
- Caracterizar morfológica y composicionalmente las capas anódicas.
- Caracterizar las propiedades antibacterianas de las superficies modificadas mediante anodizado.

3. Fundamentación teórica

3.1. Patógenos

Los agentes infecciosos comprenden una amplia diversidad de entidades biológicas, incluyendo virus, bacterias, hongos, parásitos y agentes acelulares como los priones, y presentan un rango de tamaños extraordinariamente amplio. Estos pueden variar desde agregados proteicos nanométricos, como los priones, hasta organismos pluricelulares macroscópicos, como los helmintos del género *Taenia*, que pueden alcanzar longitudes de varios metros (Prusiner, 1998; Madigan et al., 2018; Garcia, 2016). Se caracterizan por necesitar de un huésped para su proliferación alcanzando de esta manera colonizar desde tejidos hasta sistemas, afectando así el funcionamiento normal de cuerpo humano.

3.2. Virus y bacterias nosocomiales

Las infecciones nosocomiales, en inglés healthcare-associated infections -HAI-, se refieren a infecciones que surgen en cualquier entorno hospitalario o ambulatorio y aparecen 48 horas después de la hospitalización, o dentro de los 30 días después de recibir atención médica, o hasta 90 días después de someterse a ciertos procedimientos quirúrgicos (Tobin & Zahra, 2025). Un factor importante en los virus/bacterias nosocomiales es su prevalencia en superficies inanimadas, además de contaminar las habitaciones y equipos hospitalarios por medio de las manos de los trabajadores del personal clínico. Tales patógenos son una problemática fundamental en el sector clínico debido al aumento en los costos de la atención médica, su prevalencia y su probabilidad de presentar un riesgo letal en los pacientes. Los pacientes más vulnerables a padecer alguna enfermedad derivada de patógenos nosocomiales son aquellos con sistemas inmunológicos debilitados, heridas quirúrgicas o tratamientos prolongados. No obstante, las infecciones

nosocomiales se pueden prevenir cumpliendo las estrictas normas de limpieza, desinfección y monitoreos constantes.

3.3. El flúor como agente antibacteriano

En la actualidad, es ampliamente conocido el uso del flúor como agente antibacteriano en los productos de higiene bucal debido a que disminuye la adhesión bacteriana, la probabilidad de que las lesiones ocasionadas por las caries se extiendan, además de fortalecer el esmalte dental y disminuir la acidez. "La presencia de flúor próximo a la superficie del diente reduce la solubilidad del mismo, dándole mayor dureza, y haciéndolo más resistente a la acción de los ácidos y por tanto al inicio de la caries. Sobre las bacterias cariogénicas, el flúor actúa inhibiendo su metabolismo y su adhesión y agregación a la placa dental." (Gómez Santos. G (2002) Flúor y fluorosis dental. Pautas para el consumo de dentífricos y aguas de bebida en Canarias, p. 16).

Otro método para preservar la higiene oral es por medio de la fluoración del agua, dicho proceso se basa en la adición de fluoruro al suministro de agua hasta alcanzar un rango de concentración entre los 0.7 ppm hasta 1.2 ppm. Sin embargo, durante años en Estados Unidos se realizaron debates e investigaciones para corroborar la influencia del flúor en el aumento de osteosarcomas hasta que en 2011 los investigadores examinaron la posible relación entre la exposición al fluoruro y el osteosarcoma de una manera diferente midiendo la concentración de fluoruro en muestras de hueso normal adyacentes al tumor de la persona. Debido a que el fluoruro se acumula naturalmente en los huesos, este método proporciona una medición más precisa de la exposición acumulativa del fluoruro. El análisis no mostró diferencias en las concentraciones de fluoruro en los huesos entre las personas con osteosarcoma y las personas en un grupo de control que tenían otros tumores óseos malignos. (National Cancer Institute, 2022, párr. 7)

3.4. El anodizado

El ácido sulfúrico es el electrolito más comúnmente utilizado en procesos de anodizado de aleaciones de aluminio. Bajo condiciones controladas, permite obtener películas de óxido poroso con alta uniformidad. La microestructura porosa facilita posteriores procesos de funcionalización, como la incorporación de iones específicos.

La morfología y estructura de la capa formada dependen fuertemente del tipo de electrolito utilizado, la densidad de corriente y el tiempo de tratamiento (Baron-Wiechec et al., 2013). El anodizado de aluminio y sus aleaciones es un tratamiento superficial, el cual consiste en el crecimiento controlado de una capa de óxido mediante un proceso electrolítico, estas películas están compuestas principalmente por alúmina amorfa, aunque pueden incorporar elementos específicos del electrolito, como es el caso de azufre y fósforo, al utilizar soluciones de ácido sulfúrico o fosfórico, respectivamente. Las películas tienen una capa barrera delgada en la intercara metal/óxido y una capa porosa exterior, esta última contiene poros finos nacientes en la superficie de la película, los cuales se forman poco tiempo después del anodizado, y poros principales con morfología cilíndrica de mayor tamaño situados en el cuerpo principal de la película. Parámetros como: las dimensiones de la capa barrera, los poros y las celdas dependen del voltaje de anodizado, con una relación típica de 1nm/V^{-1} (O'Sullivan & Wood, 1970).

Skeldon y colaboradores han demostrado que el anodizado en ácido sulfúrico da lugar a capas de óxido con características reproducibles y adecuadas para modificaciones posteriores, gracias a su espesor controlable y elevada densidad de poros (Garcia-Vergara et al., 2006).

El ácido fosfórico, por otro lado, se emplea cuando se desea obtener capas con poros de mayor diámetro, generalmente para aplicaciones electrónicas o como paso previo a tratamientos adicionales como el grabado selectivo o la deposición de partículas funcionales.

4. Metodología

4.1. Material

En el presente trabajo se ha empleado una aleación 6063 T5 cuya composición se recoge en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición química del aluminio 6063 T5 (% en peso).

	Al	Mn	Si	Cr	Cu	Zn	Fe	Ti	Mg
6063 T5	Base	0.03	0.54	0.01	0.01	0.01	0.19	0.01	0.52

4.2. Desbaste

Las probetas de aleación de aluminio 6063 T5 fueron inicialmente lijadas manualmente con papel de lija de carburo de silicio, comenzando con grano #600 y finalizando con grano #1200, con el objetivo de eliminar impurezas superficiales y obtener una rugosidad controlada para el proceso de anodizado.

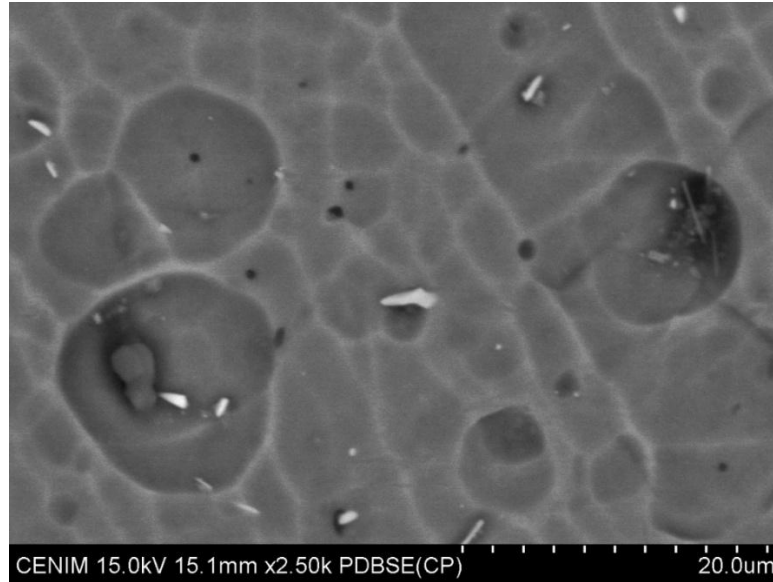
4.3. Limpieza alcalina y decapado ácido

Posteriormente, se realizó un ataque químico alcalino sumergiendo las muestras en 250 mL de una disolución de hidróxido de sodio (NaOH) a 0.5 M. Esta solución fue calentada a 40 °C mediante un baño maría con aceite de silicona. La duración del ataque fue de 10 minutos, tiempo suficiente para que el NaOH reaccionara con la superficie y expusiera la estructura superficial deseada.

Finalizado este proceso, las muestras se enjuagaron con agua destilada para eliminar residuos de la solución alcalina. A continuación, se sumergieron durante 15 segundos en una disolución ácida de ácido nítrico (HNO_3) a una concentración de 7.2 M, para eliminar la capa de smut compuesta por óxidos que se genera durante el tratamiento alcalino. Luego, se enjuagaron nuevamente con agua destilada, seguidas de un enjuague con alcohol y finalmente se secaron utilizando un secador de aire caliente.

En la Figura 1 se observa la microestructura superficial del aluminio tras los tratamientos de limpieza alcalina y decapado ácido, así como después del pulido mecánico. Se identifican partículas brillantes correspondientes a intermetálicos ricos en AlFeSi o AlFeMnSi , junto con partículas más oscuras asociadas a la fase Mg_2Si . Estos resultados indican que los intermetálicos presentes en la aleación de aluminio 6063 permanecen expuestos en la superficie después de ambos procesos de pretratamiento y, por tanto, desempeñan un papel activo durante las etapas posteriores de anodizado o deposición de fluor. (Medel-Plaza et al., 2024).

Figura 1. Micrografía SEM de la superficie del aluminio AA 6063-T5 tras el tratamiento de limpieza alcalina y decapado ácido.



4.4. Montaje de la muestra

Las muestras fueron montadas en una pipeta de plástico tipo Pasteur, asegurándolas con un cable conductor de cobre desde el interior. La conexión eléctrica entre la probeta de aluminio y el cable de cobre se garantizó mediante una cinta de cobre en contacto directo con la superficie posterior de la aleación. Para proteger las zonas en las que se realiza el contacto eléctrico durante el anodizado, se aplicaron dos capas de laca aislante en las zonas opuesta a la región expuesta, con el fin de evitar la oxidación del cobre o áreas no objetivo. Cabe destacar que esta laca fue eliminada de la superficie objeto de estudio con tolueno.

4.5. Proceso de anodizado

4.5.1. Preparación del electrolito

Para el anodizado se empleó una solución orgánica diseñada para favorecer la formación de una película de óxido poroso e incorporar iones fluoruro (F^-) desde la solución sobre la

superficie de la aleación de aluminio 6063 T5. La composición del electrolito fue 950 mL de etilenglicol ($C_2H_6O_2$), 50 mL de agua destilada (H_2O) y 11.1 g de fluoruro de amonio (NH_4F).

La mezcla se preparó en un vaso de precipitados limpio y se agitó suavemente hasta lograr la disolución completa del NH_4F .

4.5.2. Condiciones del anodizado

El proceso de anodizado se llevó a cabo utilizando un sistema de celda electroquímica de dos electrodos, bajo las siguientes condiciones (Tabla 2).

Tabla 2. Condiciones de anodizado.

Electrodo de trabajo (ánodo)	Aleación Al 6063 T5
Contraelectrodo (cátodo)	Platino (Pt)
Área efectiva expuesta	Delimitada con laca de enmarcarar
Voltaje aplicado	230 V DC
Densidad de corriente	50 mA/cm ²
Temperatura del electrolito	18 °C
Volumen de solución en celda	250 mL
Agitación	No se utilizó (0 RPM)
Tiempo de anodizado	30 segundos

El anodizado se llevó a cabo bajo condiciones potencioestáticas, manteniendo un voltaje constante durante todo el tratamiento.

4.5.3. Postratamiento

Al concluir el proceso de anodizado, las muestras se retiraron del electrolito y se sumergieron inmediatamente en etanol durante 15 minutos para eliminar residuos orgánicos y facilitar el secado. Posteriormente, las muestras se dejaron secar al ambiente o mediante corriente de aire.

Este procedimiento permitió no solo la formación de una película de óxido, sino también la incorporación de iones fluoruro, los cuales son conocidos por su efecto antibacteriano.

4.6. Caracterización de las capas anódicas

4.6.1. Ángulo de contacto

En el caso de las aleaciones de aluminio sometidas a anodizado, la medición del ángulo de contacto resulta especialmente útil para analizar la formación de capas de óxido porosas y las modificaciones inducidas en la química superficial, las cuales influyen directamente en la interacción sólido-líquido (Sulka, 2008).

Con el propósito de comprender cómo el proceso de anodizado influye sobre la mojabilidad de la superficie de la aleación AA 6063, se seleccionaron cuidadosamente cinco muestras representativas del lote experimental. La elección se realizó considerando tanto la integridad física como la uniformidad del acabado previo al tratamiento, buscando garantizar resultados fiables y reproducibles.

A cada una de estas muestras se les midió el ángulo de contacto en dos etapas clave del estudio: antes y después del proceso de anodizado. Esta medición se llevó a cabo utilizando el equipo Theta Attension optical tensiometer (KSV Instruments) como se evidencia en la Figura 2, que permite obtener imágenes de alta resolución del perfil de la gota y calcular automáticamente los ángulos de contacto mediante análisis de contorno.

Figura 2. Medición del ángulo de contacto mediante el equipo Theta Attension optical tensiometer (KSV Instruments).



4.6.2. Rugosidad superficial

Se seleccionaron doce muestras de aleación de aluminio, sobre las cuales se realizaron mediciones de rugosidad superficial antes y después del proceso de anodizado. Para ello, se utilizó un interferométrico confocal PLμ 2300 (Sensofar), equipado con un objetivo EPI 20x, que permitió capturar detalles topográficos a nivel micrométrico con alta resolución.

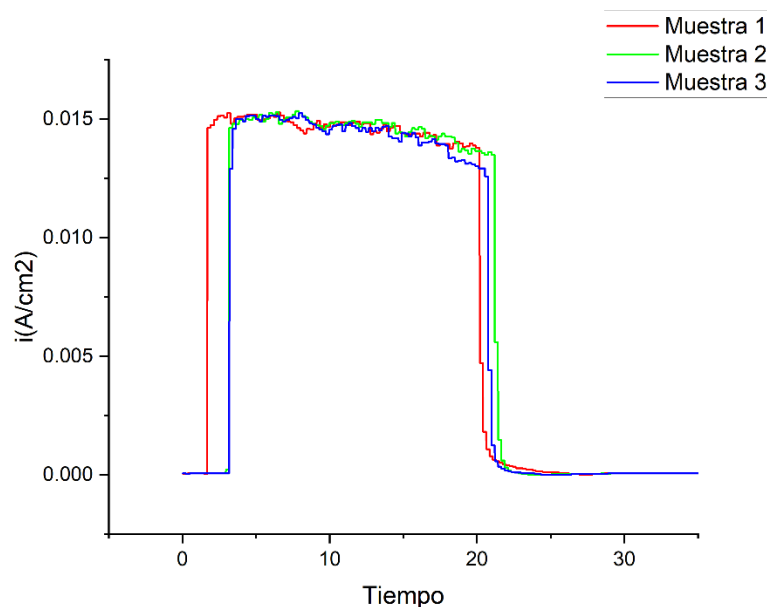
5. Resultados y Discusión

5.1. Anodizado

El anodizado de la aleación de aluminio 6063-T5 se llevó a cabo en un electrolito orgánico compuesto por etilenglicol (EG), agua destilada y fluoruro de amonio (NH_4F), aplicando un voltaje constante de 230 V DC y una densidad de corriente de $50 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$, a una temperatura controlada de $18 \text{ }^\circ\text{C}$ y sin agitación. Estas condiciones difieren significativamente de los anodizados convencionales en medios acuosos ácidos, dando lugar a mecanismos de crecimiento y disolución del óxido de naturaleza distinta.

La Figura 3 muestra la evolución de la densidad de corriente en función del tiempo ($i-t$) durante el proceso de anodizado. En todas las muestras se observa un comportamiento reproducible, caracterizado por un incremento inicial de la corriente hasta alcanzar un valor casi constante, seguido de una caída al finalizar el ensayo.

Figura 3. Evolución de la densidad de corriente en función del tiempo durante el proceso de anodizado.



El incremento inicial de la densidad de corriente se asocia al establecimiento del campo eléctrico y al inicio del crecimiento de la capa barrera de óxido de aluminio en la interfase metal/óxido. Posteriormente, la aparición de una meseta de corriente indica la entrada del sistema en un régimen cuasi-estacionario, en el cual se alcanza un equilibrio dinámico entre la formación del óxido en la interfase metal-óxido y su disolución asistida por campo en la interfase óxido-electrolito. Este comportamiento es característico del anodizado de aluminio en electrolitos que contienen fluoruro, donde los aniones F^- promueven la disolución local del óxido y favorecen el desarrollo de una estructura porosa. Finalmente, la caída abrupta de la corriente corresponde a la interrupción del proceso de anodizado al finalizar el tiempo programado, confirmando el control electroquímico del ensayo y la correcta ejecución del protocolo experimental.

En el sistema EG-NH₄F empleado, el crecimiento de la capa de óxido no puede considerarse un proceso puramente pasivo. La presencia de especies fluoruro en el electrolito

introduce un mecanismo adicional de disolución químico-electroquímica que actúa simultáneamente sobre el óxido en formación y sobre el sustrato metálico. Bajo la acción del campo eléctrico aplicado, este fenómeno da lugar a un régimen dinámico en el que la formación del óxido en la interfase metal/óxido coexiste con su disolución localizada en la interfase óxido/electrolito.

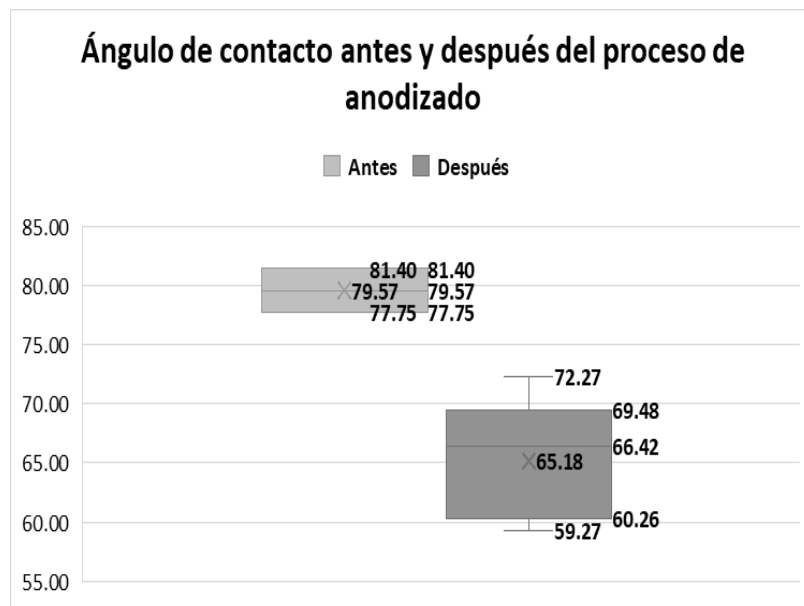
Dado que el anodizado realizado es un anodizado sin sellar, la capa formada conserva su porosidad abierta. Esta condición favorece tanto la interacción de la superficie con el medio como la posible incorporación o retención de especies químicas procedentes del electrolito, en particular fluoruro, lo cual resulta relevante para aplicaciones funcionales como la modificación de la mojabilidad y el potencial comportamiento antibacteriano de la superficie (O'Sullivan & Wood, 1970; Thompson, 1997; Sulka, 2008).

5.2.Ángulo de contacto

Este procedimiento permitió observar de forma directa los cambios en la mojabilidad inducidos por la formación de la capa anódica. Más allá de los valores numéricos obtenidos, este análisis ayudó a interpretar de manera más profunda el comportamiento funcional de la superficie.

De acuerdo con la Figura 4, antes del anodizado, las superficies presentan ángulos de contacto elevados, con valores concentrados alrededor de 78–81° evidenciado, lo que es característico de superficies de aluminio con óxido natural compacto y relativamente homogéneo.

Figura 4. Valores del ángulo de contacto antes y después del proceso de anodizado.



Tras el anodizado, se observa una disminución significativa del ángulo de contacto, con valores medios cercanos a 65° , lo que indica un aumento de la hidrofiliidad de la superficie. Este comportamiento se asocia a la formación de una capa de óxido anodizado porosa, cuya morfología incrementa la rugosidad efectiva y la energía superficial del material. La presencia de una estructura nanoporosa favorece la retención de agua en la superficie y modifica el equilibrio interfacial sólido-líquido, promoviendo una mayor afinidad por fases acuosas, fenómeno ampliamente descrito para óxidos anódicos de aluminio formados en condiciones de crecimiento no selladas (Thompson, 1997; Sulka, 2008)

Desde un punto de vista funcional, la reducción del ángulo de contacto resulta especialmente relevante en aplicaciones donde se busca limitar la adhesión bacteriana inicial. Diversos estudios han demostrado que superficies más hidrofílicas tienden a dificultar la fijación de microorganismos. Este efecto es particularmente efectivo cuando se combina con superficies

de elevada energía superficial y heterogeneidad química, condiciones típicas de películas de óxido anódico poroso, contribuyendo así a la disminución del riesgo de colonización microbiana en etapas iniciales (Busscher et al., 2012; Zhao et al., 2014).

5.3. Rugosidad superficial

Para estas mediciones se realizaron considerando dos direcciones ortogonales (ejes X e Y) con el fin de obtener una caracterización representativa de la topografía superficial.

Los valores obtenidos se registraron en unidades de nanómetros (nm) y se calcularon los promedios para cada eje. Los resultados se presentan en la Tabla 3, los cuales corresponden al estado inicial de las muestras previo al tratamiento de anodizado.

Tabla 3. Datos de rugosidad tomados antes de realizar el proceso de anodizado.

AA 6063 – T5			
Valores X (nm)	MUESTRA	Valores Y (nm)	MUESTRA
1	368,44	1	429,01
2	351,22	2	448,89
3	371,68	3	430,35
4	390,09	4	424,62
5	420,46	5	446,24
6	429,3	6	446,84
7	430,36	7	435,86
8	430,53	8	466,69
9	477,41	9	459,51
10	472,61	10	441,04
11	490,25	11	492,06
12	428,04	12	422,94
Promedio	421,7	Promedio	445,35
Desviación estándar	44,67	Desviación estándar	19,97

El mismo procedimiento se aplicó a las muestras tras haber sido sometidas al proceso de anodizado, con el objetivo de evaluar los cambios topográficos inducidos por el tratamiento superficial (Tabla 4).

Tabla 4. Datos de rugosidad tomados después de realizar el proceso de anodizado.

AA 6063 – T5 ANODIZADA			
Valores X (nm)	MUESTRA	Valores Y (nm)	MUESTRA
1	518,14	1	663,77
2	577,75	2	625,63
3	570,59	3	644,25
4	615,17	4	598,14
5	569,32	5	548,49
6	565,64	6	602,31
7	568,71	7	572,62
8	606,36	8	576,13
9	659,91	9	513,73
10	564,06	10	554,33
11	576,4	11	503,46
12	557,26	12	592,37
Promedio	579,11	Promedio	582,85
Desviación estándar	34,98	Desviación estándar	48,7

El análisis de los datos de rugosidad obtenidos antes y después del anodizado (**Apéndice A**) revelan un cambio significativo en la topografía superficial de la aleación AA 6063. Inicialmente, la superficie presentaba una rugosidad considerable, probablemente asociada a al proceso de preparación superficial. Sin embargo, tras el anodizado, se evidenció un aumento notable en los valores promedio de rugosidad presentados en la tabla 4, lo cual es coherente con la formación de una capa de óxido de aluminio porosa, sin embargo, este incremento significativo de

la rugosidad superficial se atribuye principalmente a proceso de disolución expuestos en los resultados del anodizado.

Este resultado no solo confirma que el anodizado modifica de forma sustancial la morfología de la superficie, sino que también destaca su potencial para aplicaciones funcionales. Una superficie más rugosa puede mejorar la interacción con soluciones químicas o favorecer la incorporación de compuestos. Comprender y valorar estos cambios resulta clave al momento de diseñar superficies con características específicas para aplicaciones avanzadas.

5.4. Estudio microestructural

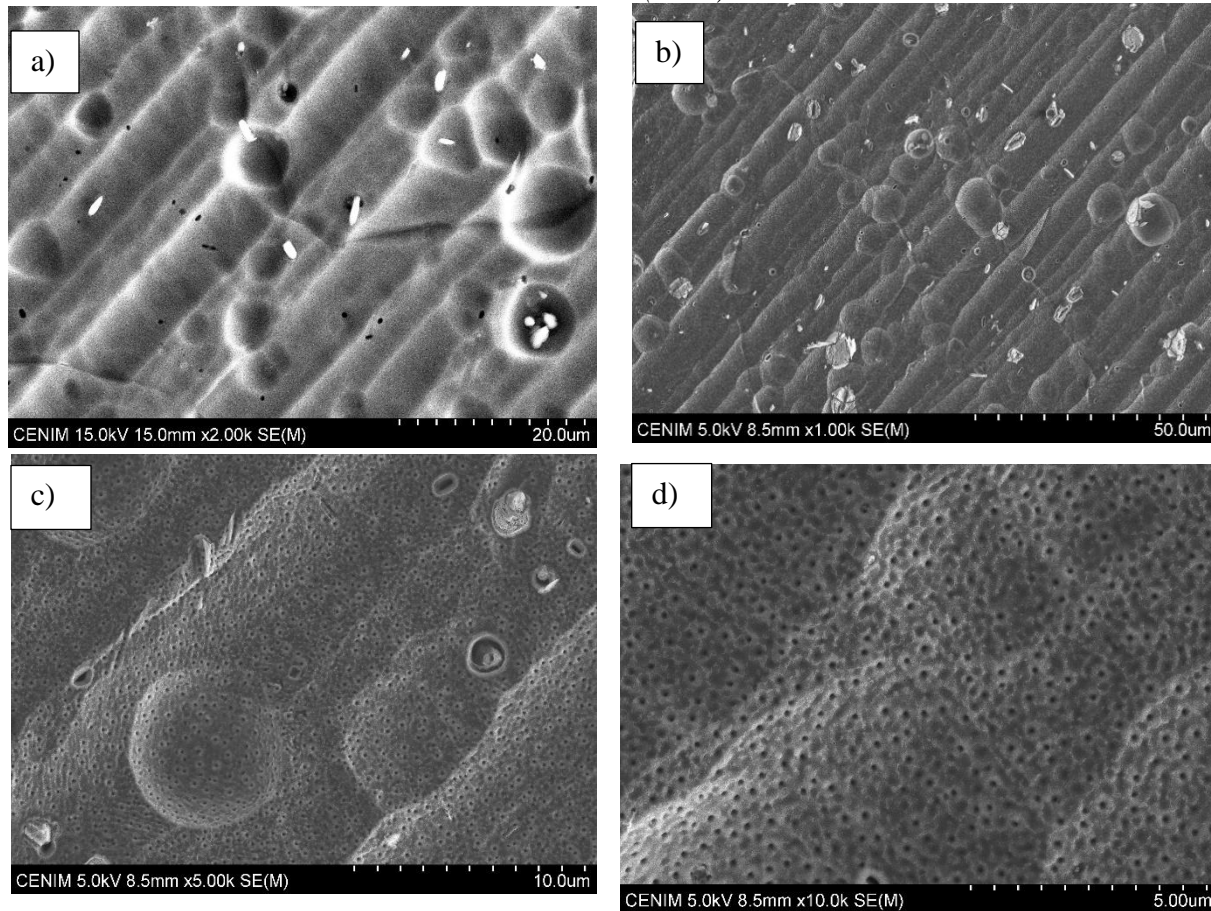
A partir de la observación detallada de las micrografías obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) expuestas en la Figura 5, se identificó con claridad la formación de una estructura porosa homogénea sobre la superficie tratada, rasgo característico del anodizado en aleaciones de aluminio. La densidad y distribución de los poros en gran parte del área observada sugiere que el proceso de crecimiento del óxido se desarrolló de manera controlada y uniforme, lo cual es indicativo de una adecuada configuración de los parámetros electroquímicos aplicados (Thompson, 1997).

En las imágenes capturadas a mayores aumentos (10.000× y 5.000×), se aprecia con nitidez una disposición de poros circulares con distribución casi hexagonal, una característica asociada al fenómeno de autoorganización de la alúmina porosa que ocurre cuando se mantienen condiciones estables de voltaje, temperatura y composición del electrolito durante el proceso de anodizado (Sulka, 2008).

Por otro lado, en los aumentos más bajos (1.000× y 2.000×), es posible identificar la presencia partículas brillantes dispersas sobre la superficie, las cuales podrían corresponder a los

intermetálicos presentes en la aleación o la aleación de aluminio - intermetálicos de AlFeSi y/o AlFeMnSi.

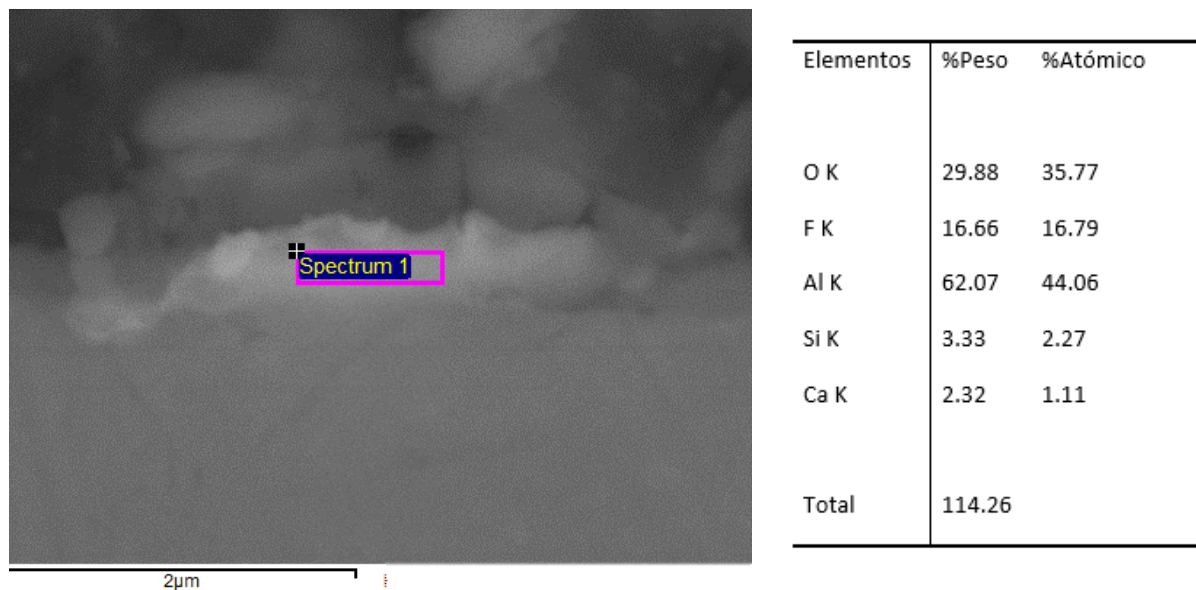
Figura 5. Caracterización Morfológica Superficial mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).



En conjunto, los resultados obtenidos a través del análisis SEM permiten concluir que el proceso de anodizado fue exitoso en la formación de una capa porosa bien desarrollada, capaz de facilitar interacciones químicas con medios acuosos y apta para aplicaciones funcionales. El análisis de composición de la capa anódica revela la incorporación de flúor en la capa.

Además, al realizar el corte metalográfico de la muestra anodizada, se observa que el espesor de la capa es de unos 300-500 nm (Figura 6).

Figura 6. Corte transversal de la capa anódica sobre aluminio AA 6063-T5 analizado mediante SEM-EDS tras el proceso de anodizado.



El análisis SEM-EDS del corte transversal de la muestra anodizada confirma la formación de una capa de óxido sobre el aluminio AA 6063-T5 tras el proceso de anodizado. El espectro EDS obtenido en la región de la capa anódica muestra la presencia mayoritaria de Al y O, lo cual es consistente con la formación de alúmina. Adicionalmente, se detecta una señal significativa de F, atribuida al uso de NH_4F en el electrolito, lo que evidencia la incorporación parcial de este anión en la película anódica.

5.5. Caracterización electroquímica

5.5.1. Curvas de polarización

En esta sección se presentan y analizan las curvas de polarización obtenidas antes y después del tratamiento de anodizado con fluoruro de amonio. Este análisis permitió evaluar la resistencia a la corrosión de las aleaciones de aluminio AA 6063 en una solución que simula el sudor formulado con base en el estudio del United States Mint sobre materiales alternativos, el cual

propone una mezcla de 40g NaCl, 5g Na₂HPO₄ y 4 mL de ácido láctico en 2L de agua destilada para simular un sudor (Concurrent Technologies Corporation, 2012).

A partir de las curvas de polarización obtenidas en medio simulado de sudor, se realizó el análisis Tafel de la rama anódica para cada muestra. El análisis cuantitativo de las curvas de polarización se llevó a cabo utilizando el software OriginPro 2025b, con el objetivo de determinar los parámetros electroquímicos clave: el potencial de corrosión (E_{corr}), la densidad de corriente de corrosión (I_{corr}) y la pendiente de Tafel anódica (β_a).

Debido a la ausencia de una región lineal bien definida en la rama catódica de las curvas de polarización, no fue posible determinar de forma fiable una pendiente Tafel catódica (β_c). Este comportamiento es característico de sistemas de aluminio expuestos a medios que contienen especies agresivas como el fluoruro. En estas condiciones, la respuesta catódica se ve influenciada por fenómenos difusionales que limitan la extrapolación lineal de la rama catódica (Bard & Faulkner, 2001; Orazem & Tribollet, 2017).

Para la estimación de los parámetros cinéticos se seleccionó un intervalo de potencial restringido alrededor del potencial de corrosión (± 100 mV respecto a E_{corr}), en el cual la respuesta del sistema está dominada por la transferencia de carga y se minimiza la influencia de efectos difusionales o transiciones a estados pasivos. Este enfoque permite una extrapolación más consistente de las regiones aproximadamente lineales de las curvas de polarización, garantizando una estimación más representativa de los parámetros electroquímicos del sistema (ASTM G102-89; Mansfeld, 1990).

Inicialmente, las curvas se ampliaron en el entorno de E_{corr} para mejorar la visualización de las regiones de interés. Para asegurar que el análisis se realizara únicamente dentro del tramo seleccionado, se utilizó la herramienta Mask Points on Active Plot, la cual excluyó los puntos fuera

del rango visualmente definido. Seguidamente, se aplicó la herramienta Analysis > Fitting > Linear Fit, que permitió generar la recta correspondiente a la pendiente anódica de Tafel.

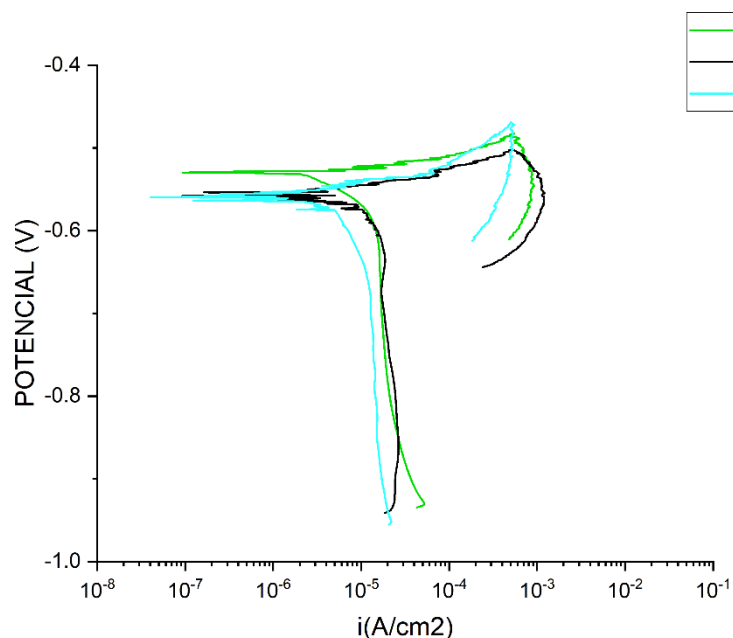
Una vez generadas las regresiones lineales, se trazaron dos líneas auxiliares: Una línea vertical desde el valor de E_{corr} y una línea horizontal desde el punto de intersección de las regresiones anódica y catódica.

El valor de I_{corr} se estimó gráficamente como el punto de intersección entre la línea ajustada y el valor de E_{corr} , representado por la proyección de líneas auxiliares verticales y horizontales. Este procedimiento fue repetido de forma consistente para todas las muestras antes y después del anodizado.

5.5.1.1. Curvas de polarización antes del anodizado

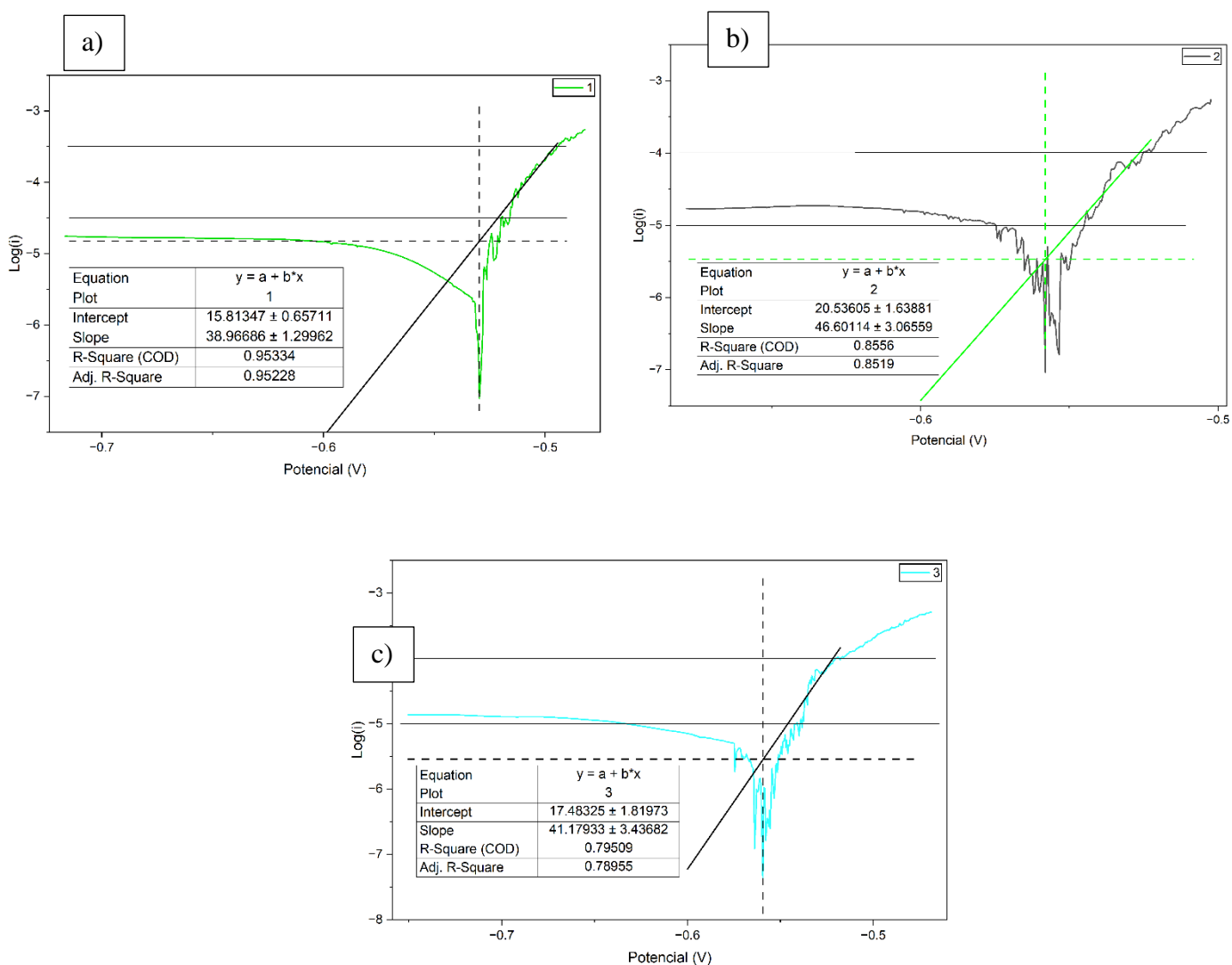
En la Figura 7 se muestran las curvas de polarización obtenidas antes del proceso de anodizado donde se evidencia el control catódico presente en el sistema expuesto anteriormente.

Figura 7. Curvas de polarización potenciodinámica antes del anodizado.



En la Figura 8, se muestran las curvas correspondientes a cada muestra, junto con sus ajustes lineales matemáticos y los valores de pendiente (slope) y ordenada en el origen, además de los coeficientes de determinación R^2 obtenidos.

Figura 8. Ajuste de regiones Tafel anódica antes del anodizado.



Nota: a) la muestra 1 antes del anodizado b) muestra 2 antes del anodizado c) muestra 3 antes del anodizado

A partir de estas pendientes, se calcularon las pendientes anódicas β_a mediante la relación inversa:

$$\beta_a = \frac{1}{\text{slope}} * 1000 \text{ (en mV/dec)}$$

El valor de I_{corr} se estimó gráficamente como el punto de intersección entre la línea ajustada y el valor de E_{corr} , representado por la proyección de líneas auxiliares verticales y horizontales.

Los resultados cuantitativos se resumen en la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros electroquímicos obtenidos a partir de la extrapolación de curvas de Tafel antes del proceso de anodizado.

Muestra	Slope (V/dec)	β_a (mV/dec)	I_{corr} (A/cm²)	E_{corr} (V)	R²
1	38.9668	25.65	1.50x10 ⁻⁵	-0.529639	0.953
2	46.6011	21.46	3.61x10 ⁻⁶	-0.558048	0.856
3	41.1793	24.27	2.86x10 ⁻⁶	-0.559387	0.795

Se observa que la muestra 1 presenta el menor valor de I_{corr} , lo que sugiere una menor velocidad de corrosión relativa frente a las otras dos muestras. Este comportamiento está acompañado de un valor de E_{corr} más noble (-0.529 V), lo que indica una ligera tendencia hacia menor actividad anódica. La pendiente anódica β_a de 25.65 mV/dec también sugiere una cinética más lenta del proceso de disolución.

En la Tabla 5 se observa que las muestras 1, 2 y 3 presentan valores cercanos de I_{corr} dentro del orden de 10⁻⁶ a 10⁻⁵ y potenciales de corrosión E_{corr} (entre -0.529 y -0.559 V), lo que sugiere un comportamiento electroquímico relativamente homogéneo antes del proceso de anodizado. Esta similitud indica una buena reproducibilidad de los ensayos en cuanto a su cinética de corrosión, bajo las condiciones experimentales aplicadas.

Las diferencias observadas en las pendientes anódicas (β_a) pueden estar asociadas a ligeras variaciones en la morfología superficial o el estado de pasivación inicial del aluminio 6063-T5,

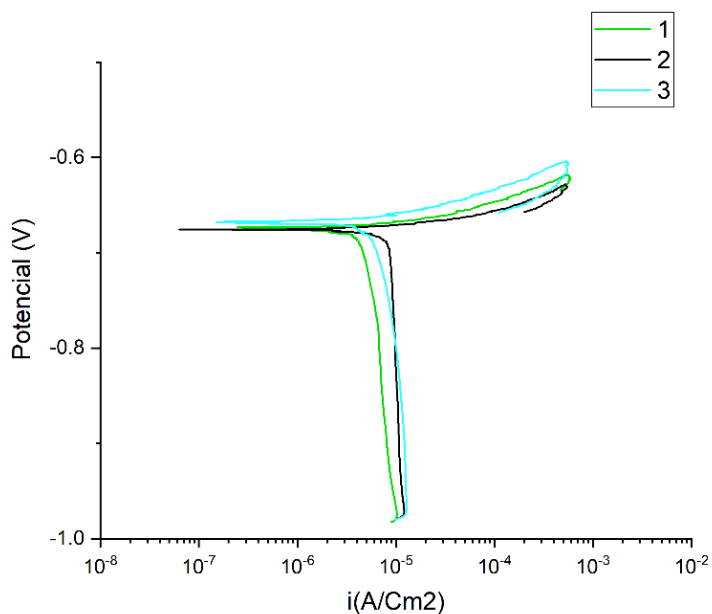
pero no representan un cambio sustancial en la susceptibilidad general del material frente al ataque corrosivo.

El valor del coeficiente R^2 en todas las muestras supera 0.79, lo cual indica que los ajustes lineales en la región Tafel son estadísticamente confiables para el rango seleccionado. Esto valida la selección del intervalo ± 100 mV respecto a E_{corr} , como es recomendado en la literatura técnica (ASTM G102-89, 2015).

5.5.2. Curvas de polarización después del anodizado

Tras el tratamiento de anodizado, todas las curvas muestran un desplazamiento muy ligero de la densidad de corriente de corrosión, es decir de la densidad de corriente límite de difusión hacia valores más pequeños que las muestras de referencia sin anodizar y un desplazamiento hacia valores de potencial más negativos (Figura 9).

Figura 9. Curvas de polarización potenciodinámica después del anodizado.

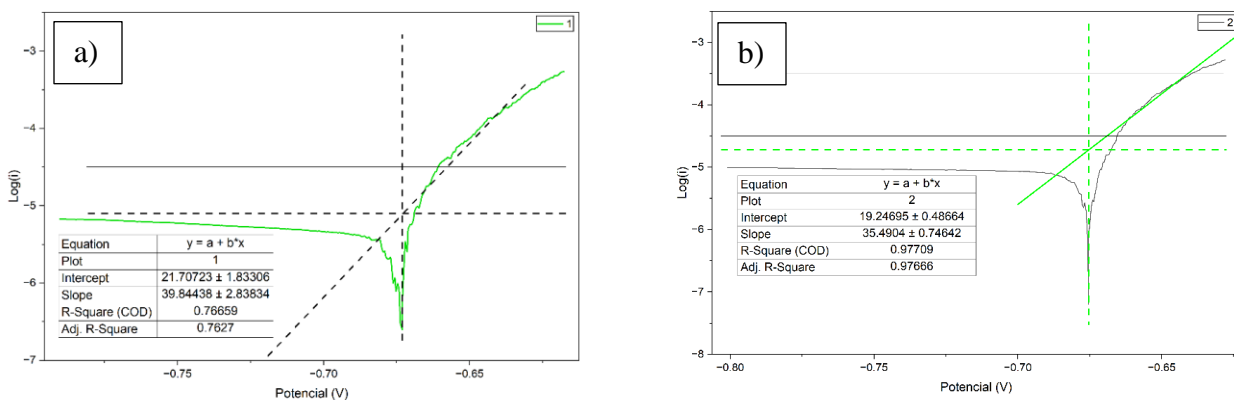


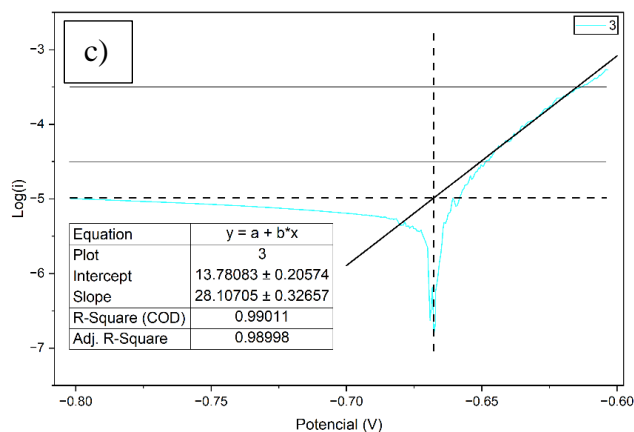
Nota: Se obtuvieron en una disolución que simula el sudor para las muestras anodizadas de aluminio AA 6063.

Desde el punto de vista electroquímico, la capa anódica formada induce una modificación de la respuesta superficial del aluminio, manifestada por una disminución de la densidad de corriente en la región de disolución activa y un incremento progresivo de la corriente en la rama anódica, sin evidenciar una pasivación bien definida. Este comportamiento es característico de películas de óxido porosas no selladas, en las que la protección frente a la corrosión no se basa en una barrera pasiva continua, sino en la resistencia parcial que ofrece la película al transporte de especies desde el medio hacia el sustrato metálico. En estos sistemas, la respuesta electroquímica está gobernada por la interacción entre el electrolito y las zonas del sustrato accesibles a través de poros y defectos de la capa, dando lugar a una protección limitada y dependiente del tiempo de exposición (Jones, 1996; Orazem & Tribollet, 2017).

En la Figura 10 se presentan las curvas obtenidas para cada una de las muestras, acompañadas de sus respectivos ajustes lineales, así como los valores de la pendiente (slope), la ordenada al origen y los coeficientes de determinación R^2 calculados.

Figura 10. Ajuste de regiones Tafel anódica después del anodizado.





Nota: a) la muestra 1 antes del anodizado b) muestra 2 antes del anodizado c) muestra 3 antes del anodizado

En la Tabla 6 se evidencia que la muestra 1 muestra un valor de slope = 39.84 V/dec, lo que se traduce en una $\beta_a \approx 25.10$ mV/dec, con un $\log I_{corr} = 8.71 \times 10^{-6}$ A/cm² y $E_{corr} = -0.673$ V. A pesar de tener la mayor pendiente entre las tres muestras, su R^2 fue el más bajo (0.766), lo que indica una menor calidad de ajuste en comparación con las otras curvas. Esta muestra conserva un comportamiento electroquímico más cercano a la muestra sin anodizar, lo que sugiere una capa menos uniforme o posiblemente más delgada tras el anodizado.

Tabla 6. Parámetros electroquímicos obtenidos a partir de la extrapolación de curvas de Tafel después del proceso de anodizado.

Muestra	Slope (V/dec)	β_a (mV/dec)	I_{corr} (A/cm ²)	E_{corr} (V)	R^2
1	39.8444	25.10	8.71×10^{-6}	-0.673045	0.767
2	35.4904	28.17	1.91×10^{-5}	-0.675402	0.977
3	28.1071	35.58	1.04×10^{-5}	-0.667732	0.990

En la Tabla 6 se evidencia que la muestra 1 muestra un valor de slope = 39.84 V/dec, lo que se traduce en una $\beta_a \approx 25.10$ mV/dec, con un $\log I_{corr} = 8.71 \times 10^{-6}$ A/cm² y $E_{corr} = -0.673$ V. A pesar de tener la mayor pendiente entre las tres muestras, su R^2 fue el más bajo (0.766), lo que indica una menor calidad de ajuste en comparación con las otras curvas. Esta muestra conserva un comportamiento electroquímico más cercano a la muestra sin anodizar, lo que sugiere una capa menos uniforme o posiblemente más delgada tras el anodizado.

5.5.3 Comparación entre la aleación antes y después del proceso de anodizado

En esta sección se realiza un análisis comparativo del comportamiento electroquímico de las muestras antes y después del proceso de anodizado, Tabla 7.

Tabla 7. Resumen de los principales parámetros electroquímicos obtenidos por la extrapolación de Tafel antes y después del tratamiento de anodizado.

Muestra	Estado	Slope (V/dec)	β_a (mV/dec)	I_{corr} (A/cm ²)	E_{corr} (V/cm ²)	R^2
1	Antes	38.9668	25.65	1.50×10^{-5}	-0.529639	0.953
1	Después	39.8444	25.10	8.71×10^{-6}	-0.673045	0.767
2	Antes	46.6011	21.46	3.61×10^{-6}	-0.558048	0.856
2	Después	35.4904	28.17	1.91×10^{-5}	-0.675402	0.977
3	Antes	41.1793	24.27	2.86×10^{-6}	-0.559387	0.795
3	Después	28.1071	35.58	1.04×10^{-5}	-0.667732	0.990

El análisis de las curvas de polarización potenciodinámica antes y después del proceso de anodizado muestra que las densidades de corriente de corrosión (I_{corr}) para el aluminio AA6063-T5 permanecen dentro del mismo orden de magnitud, entre 10^{-5} y 10^{-6} A/cm², independientemente del estado superficial. Este resultado indica que, desde el punto de vista de la polarización, el anodizado no genera una disminución significativa de la velocidad global de corrosión.

Este comportamiento es coherente con la naturaleza del tratamiento anódico aplicado en este estudio, correspondiente a un anodizado poroso no sellado. En este tipo de recubrimientos, la presencia de poros abiertos, defectos y discontinuidades en la capa barrera facilita el acceso del electrolito hasta el sustrato metálico. Como consecuencia, durante los ensayos de polarización la respuesta electroquímica del sistema está fuertemente influenciada por la disolución localizada del aluminio en estas zonas activas, lo que conduce a una respuesta global comparable a la del material sin tratar, al no existir una barrera continua que aisle completamente el sustrato del medio agresivo (Jones, 1996; Fontana, 2005).

No obstante, tras el anodizado se observa un incremento sistemático de la pendiente anódica (β_a) en todas las muestras analizadas. Este aumento pone de manifiesto una modificación en la cinética de disolución anódica del aluminio, indicando que la capa de óxido formada introduce una resistencia adicional al avance de la reacción anódica. En anodizados porosos no sellados, esta resistencia no implica una pasivación completa del sistema, sino una acción de barrera parcial que ralentiza la disolución del metal sin impedirla totalmente (Medel-Plaza et al., 2024; Mansfeld, 1990).

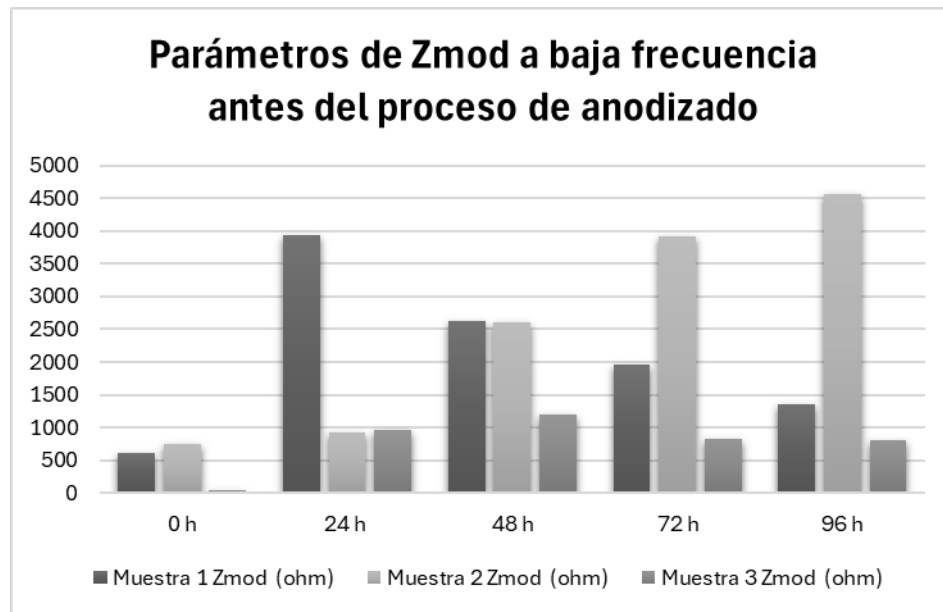
Por tanto, las curvas de polarización indican que el anodizado sin sellar modifica la cinética anódica del aluminio AA6063-T5, pero no proporciona una protección total frente a la corrosión, lo cual es consistente con la microestructura porosa del óxido formado.

5.5.4 Evaluación de la respuesta electroquímica mediante espectroscopía de impedancia (EIS)

Los valores de $|Z|$ (Z_{mod}) obtenidos a bajas frecuencias reflejan la respuesta global del sistema electroquímico; sin embargo, esta región puede verse afectada por procesos adicionales

como la adsorción y desorción de especies iónicas. Estos fenómenos se manifiestan típicamente como valores negativos de la componente imaginaria de la impedancia en los diagramas de Nyquist, impidiendo una asociación directa entre $|Z|$ a frecuencias muy bajas y la resistencia a la polarización total del sistema (Orazem & Tribollet, 2017). Por este motivo, y de acuerdo con lo recomendado en la literatura para sistemas basados en aluminio, la comparación del comportamiento frente a la corrosión se realiza preferentemente empleando los valores de $|Z|$ en torno a 1 Hz, donde la respuesta está dominada principalmente por los procesos de transferencia de carga y la contribución de fenómenos de adsorción es menor (Macdonald, 2006).

Figura 11. Variación de la impedancia a baja frecuencias en función del tiempo de inmersión de muestras sin anodizar.



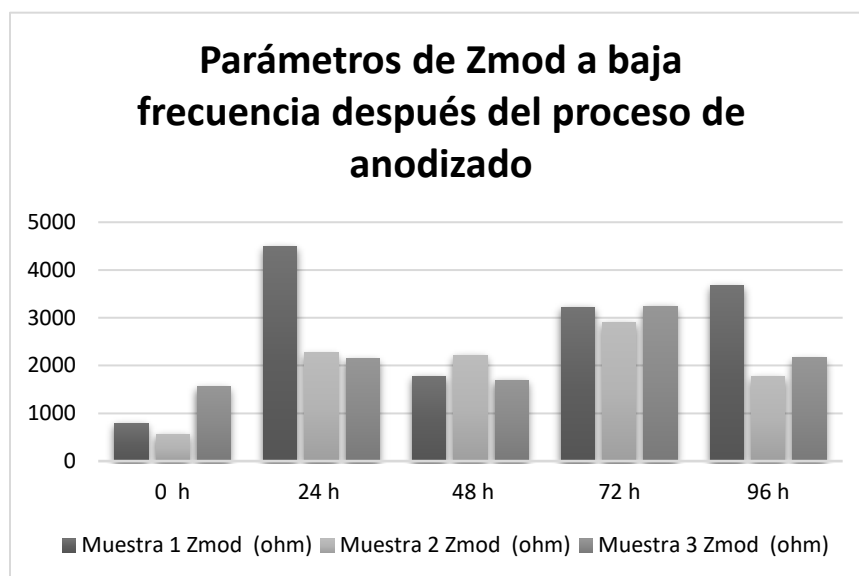
En la condición sin anodizar, las tres muestras de aluminio 6063-T5 mostradas en la Figura 11 presentan una evolución similar del módulo de impedancia ($|Z|$) con el tiempo de inmersión. Durante las primeras 24–48 h se observa un incremento inicial de $|Z|$, asociado a la formación de productos de corrosión parcialmente protectores, principalmente hidróxidos y óxidos hidratados

de aluminio, que actúan como una barrera pasiva transitoria frente al electrolito. Sin embargo, estos productos presentan una estructura porosa e inestable, por lo que su capacidad protectora disminuye progresivamente con el tiempo de exposición. Posteriormente, los valores de $|Z|$ tienden a estabilizarse o decrecer, lo que indica la degradación de la película superficial debido a la penetración de especies agresivas, particularmente iones cloruro, que favorecen el deterioro de la protección inicial (Vargel, 2004).

Aunque existen ligeras diferencias en los valores absolutos entre las réplicas (por ejemplo, valores máximos de Z_{mod} entre 2764 y 3315 Ω), el comportamiento electroquímico global es análogo. Esta reproducibilidad entre muestras permite establecer el estado inicial sin anodizar como referencia válida para la evaluación posterior del proceso de anodizado.

Los resultados de la Figura 12 demuestran que el anodizado en electrolitos con fluoruro de amonio produce un efecto barrera en la capa de óxido, generando superficies más resistentes a la degradación electroquímica. El incremento sostenido de Z_{mod} con el tiempo de inmersión de las muestras anodizadas indica una reducción en la permeabilidad de la capa y una mejor estabilidad de la interfase óxido-electrolito (Mansfeld, 1990; Orazem & Tribollet, 2017).

Figura 12. Variación de la impedancia a baja frecuencias en función del tiempo de inmersión después del proceso de anodizado.



En conclusión, la comparación del comportamiento electroquímico de las muestras antes y después del anodizado no sellado indica que la modificación superficial no conduce a un aumento significativo del módulo de impedancia a bajas frecuencias, presentando valores de $|Z|$ del mismo orden de magnitud en ambos estados. Este comportamiento es coherente con lo observado en las curvas de polarización, donde la respuesta electroquímica sigue estando parcialmente dominada por el sustrato de aluminio debido a la presencia de poros abiertos y defectos en la capa anódica formada en el electrolito EG-NH₄F.

Los diagramas de Bode y Nyquist obtenidos para las tres muestras antes del proceso de anodizado (M1, M2 y M3) presentados en el **Apéndice B**, muestran comportamientos característicos de superficies metálicas de aluminio expuestas al electrolito con cloruros como el sudor sintético empleado.

Asimismo, los ángulos de fase alcanzan valores cercanos a 70–80° en el rango intermedio de frecuencias, lo que evidencia una respuesta dominada por procesos de transferencia de carga y comportamiento dieléctrico de la capa superficial (Mansfeld, 1990; Orazem & Tribollet, 2017).

Los diagramas de Nyquist obtenidos antes del proceso de anodizado revelan un comportamiento capacitivo característico de superficies pasivadas por óxidos naturales. En general, se observan arcos semicirculares incompletos, típicos de sistemas controlados por procesos de transferencia de carga en presencia de una película superficial.

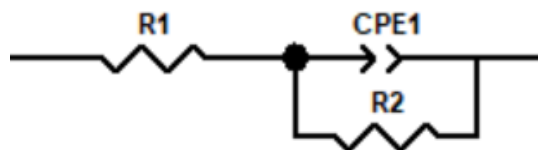
Los diagramas de Bode y Nyquist obtenidos para las tres muestras después del proceso de anodizado, presentados en el **Apéndice C**, muestran una evolución en las propiedades electroquímicas de las superficies. En los diagramas de Bode se observa un incremento en el módulo de la impedancia a bajas frecuencias (10^{-2} – 10^{-3} Hz) y un aumento del ángulo de fase en el rango de frecuencias intermedias (10^0 – 10^3 Hz).

En los diagramas de Nyquist, las muestras anodizadas presentan arcos más amplios y definidos en comparación con el estado inicial (0 h), lo que refleja un incremento en la resistencia de polarización (R_p). Además, el achatamiento de los arcos sugiere un comportamiento no ideal de tipo CPE (Constant Phase Element), relacionado con la heterogeneidad de la superficie y la distribución de tamaños de poro en la película de óxido (Bard & Faulkner, 2001). La aparición de dos constantes de tiempo en los espectros de impedancia indica la coexistencia de distintos procesos electroquímicos que contribuyen a la respuesta global del sistema. En el caso de superficies de aluminio recubiertas con capas porosas no selladas, una constante de tiempo se asocia generalmente a la respuesta dieléctrica y resistiva de la película de óxido, mientras que la segunda refleja la participación electroquímica del sustrato metálico a través de poros abiertos o

defectos estructurales. Por tanto, en este trabajo se ha optado por seguir esta interpretación, más adecuada al sistema experimental utilizado (Mansfeld, 1990; Orazem & Tribollet, 2017).

Para la simulación de los diagramas de impedancia obtenidos antes del proceso de anodizado se empleó un modelo eléctrico simplificado del tipo $R_s + (CPE_1 // R_{ct})$, el cual permite representar los fenómenos de transferencia de carga en la interfase electrodo–electrolito como se muestra en la Figura 13. En este modelo, la resistencia de la solución (R_s) fue representada por el elemento R1, que describe la oposición del electrolito al paso de la corriente eléctrica. Por su parte, la resistencia a la transferencia de carga (R_{ct}) se modeló mediante el elemento R2, asociado a los procesos de disolución y reducción en la superficie metálica. Finalmente, el comportamiento capacitivo no ideal de la interfase, influenciado por la rugosidad y heterogeneidad superficial, fue descrito mediante el elemento de fase constante (CPE_1).

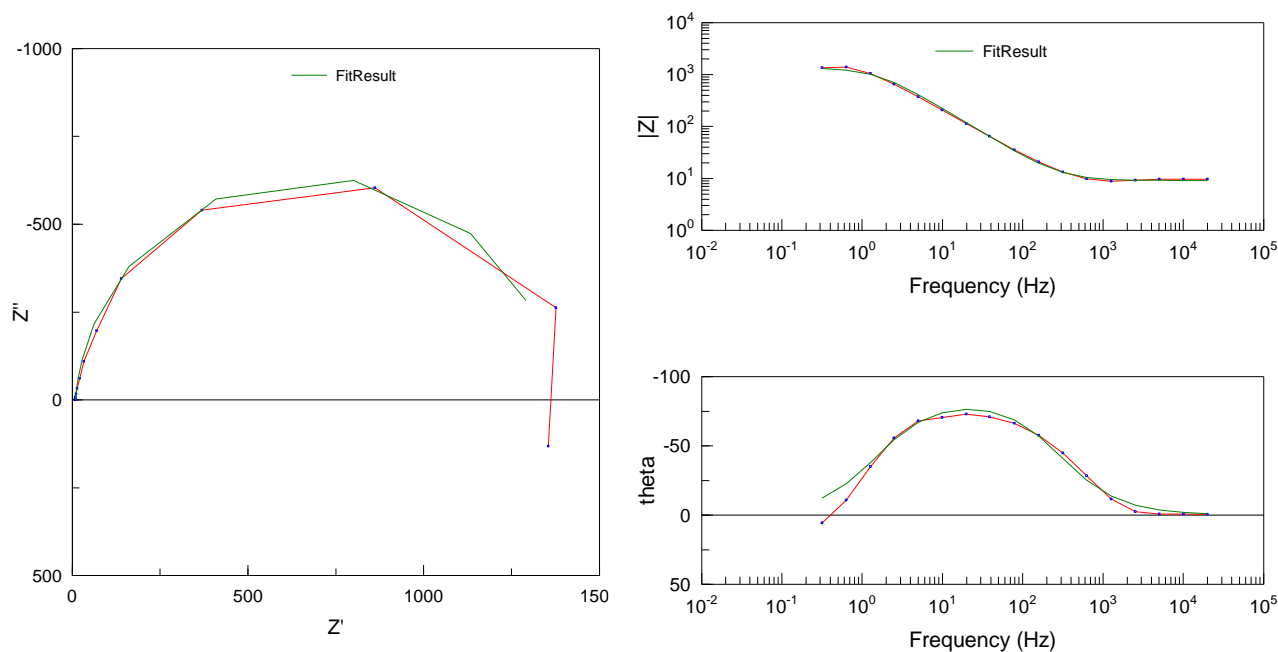
Figura 13. Circuito equivalente.



Nota: Se emplearon para simular la respuesta de las muestras antes del proceso de anodizado, obtenido en el software ZView2.

Con el propósito de corroborar la validez de los datos de impedancia experimental, las respuestas electroquímicas fueron simuladas mediante circuitos equivalentes utilizando el software ZView 2. La buena concordancia entre los resultados experimentales y los obtenidos por el ajuste, observados en los diagramas de Nyquist y Bode (Figura 14), confirma la idoneidad del circuito equivalente propuesto para describir el comportamiento electroquímico del sistema antes del anodizado.

Figura 14. Diagrama de Bode y Nyquist antes del proceso de anodizado.



Nota: Muestra 2 tras 96 horas antes inmersión

La resistencia de la solución (R_s , R_1) se mantuvo estable en todas las muestras (**Apéndice D**), con valores entre 8 y 13 $\Omega \cdot \text{cm}^2$, confirmando que el electrolito no presentó variaciones significativas durante los ensayos. Este comportamiento es característico de soluciones homogéneas y permite atribuir los cambios observados principalmente a la superficie metálica (Mansfeld, 1990).

En términos generales, los valores iniciales de resistencia de polarización (R_2) obtenidos para las tres muestras, comprendidos entre 1966 y 2629 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ a 0 h, son representativos del comportamiento electroquímico de superficies de aluminio 6063-T5 recubiertas únicamente por su película de óxido nativo. Esta película se forma de manera espontánea al exponerse el metal al aire y se caracteriza por ser delgada, amorfa y poco compacta, lo que limita su capacidad de protección frente a medios agresivos como el sudor artificial. En consecuencia, dicha capa no constituye una barrera efectiva frente a los procesos de disolución anódica, lo que resulta coherente

con los bajos valores iniciales de impedancia y con la respuesta observada previamente en las curvas de polarización (Fontana, 2005).

Durante los primeros tiempos de inmersión (24 h y 48 h), se observa en todas las muestras un aumento moderado en R_2 (hasta $\sim 3366 \Omega \cdot \text{cm}^2$ en la M1), lo que puede atribuirse a fenómenos de repasivación transitoria. En medios con cloruros es común que se formen subproductos como hidróxidos de aluminio ($\text{Al}(\text{OH})_3$) que, aunque menos estables que la alúmina anódica, ofrecen cierta resistencia temporal a la transferencia de carga (Mansfeld, 1990).

No obstante, este efecto no se mantiene en el tiempo: a las 96 h, los valores de R_2 disminuyen en todas las muestras (hasta $2111 \Omega \cdot \text{cm}^2$ en la M3), lo que evidencia que la protección otorgada por dicha capa pasiva natural es efímera e insuficiente para inhibir eficazmente la corrosión en un entorno simulado de sudor. Este comportamiento sugiere que la capa nativa se degrada por ataque localizado, pitting o disolución, facilitando el acceso de iones agresivos a la superficie metálica (Frankel, 1998; Orazem & Tribollet, 2017).

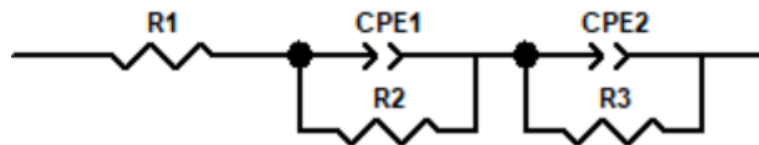
Para las muestras después del anodizado se empleó un modelo de circuito equivalente del tipo $R_s + (\text{CPE}_1 // R_{ct}) + (\text{CPE}_2 // R_b)$ el cual permitió describir de forma adecuada la respuesta electroquímica observada en los espectros de impedancia (Figura 15).

La primera constante de tiempo, asociada a los elementos R_2 y CPE_1 , se atribuye a la capa barrera de la película anódica formada durante el proceso de anodizado. Esta capa compacta controla el transporte de carga a través del óxido y actúa como el principal elemento protector frente a la corrosión. El uso de un elemento de fase constante (CPE_1) en lugar de un capacitor ideal refleja el carácter no ideal de dicha capa.

La segunda constante de tiempo, representada por los elementos R_3 y CPE_2 , se asocia a la respuesta electroquímica del sustrato metálico expuesto a través de defectos, poros abiertos o

discontinuidades presentes en la capa barrera. En el presente caso, la segunda constante de tiempo evidencia la participación del sustrato metálico en la respuesta electroquímica, en concordancia con lo reportado para anodizados sin sellado expuestos a medios agresivos (Orazem & Tribollet, 2017; Diggle, Downie & Goulding, 1969; Thompson, 1997).

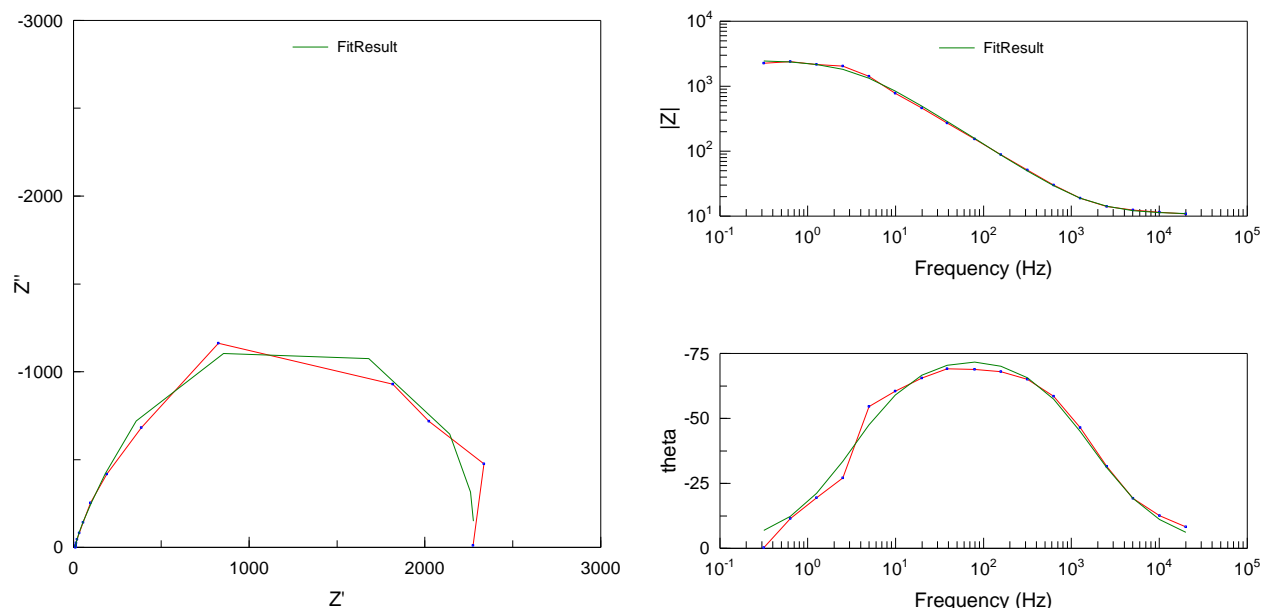
Figura 15. Circuito equivalente.



Nota: Se emplearon para simular la respuesta de las muestras después del proceso de anodizado, obtenido en el software ZView 2

La buena concordancia entre los resultados experimentales y los obtenidos por la simulación, observada en los diagramas de Nyquist y Bode (Figura 16), permite validar el modelo empleado para describir la respuesta electroquímica del sistema anodizado.

Figura 16. Diagramas de Bode y Nyquist después del anodizado.



Nota: Muestra 2 tras 96 horas de inmersión después del proceso de anodizado. El ajuste se realizó con el circuito equivalente $R_s + (CPE_1//R_{ct}) + (CPE_2//R_b)$.

Los resultados obtenidos (**Apéndice E**) muestran que la resistencia de la solución (R_s , representada como R_1) permaneció prácticamente constante y en valores bajos a lo largo de todo el ensayo, confirmando que el electrolito mantuvo una conductividad estable.

La resistencia de la solución (R_s) se mantuvo prácticamente constante durante todos los ensayos, confirmando la estabilidad del medio corrosivo y validando la comparación entre muestras y tiempos de inmersión. En cuanto a los parámetros asociados a la capa anódica, se observa un aumento de la resistencia vinculada a la capa barrera del óxido, lo que refleja la formación de una película que dificulta el transporte de carga a través de la interfase.

La resistencia a la transferencia de carga (R_{ct}), representada por el parámetro R_2 , mostró fluctuaciones entre los valores ajustados. Esta evolución es coherente con el comportamiento esperado para anodizados no sellados, en los que la presencia de poros abiertos y defectos en la capa de óxido permite la penetración progresiva del electrolito y el acceso parcial al sustrato

metálico, reduciendo gradualmente la oposición al intercambio de carga (Orazem & Tribollet, 2017; Thompson, 1997).

Las variaciones observadas en los tiempos iniciales pueden atribuirse a procesos transitorios como la adsorción de especies iónicas, que modifican temporalmente el área electroquímicamente activa. Este comportamiento es característico de anodizados formados en electrolitos que contienen fluoruro, donde la formación–disolución competitiva del óxido genera capas heterogéneas y más sensibles a la interacción con el medio cuando no se aplica un sellado posterior (Thompson, 1997; Diggle, Downie & Goulding, 1969).

5.6 Ensayo de adherencia bacteriana en superficies anodizadas con incorporación de fluoruro

En cuanto al ensayo de adherencia bacteriana, se realizaron múltiples repeticiones con el fin de garantizar la confiabilidad de los resultados. Sin embargo, los ensayos no fueron exitosos debido a la interferencia presentada por las muestras anodizadas en el electrolito a base de etilenglicol (EG) con fluoruro de amonio (NH_4F). Dichas muestras exhibieron fluorescencia intrínseca posterior al anodizado, lo que imposibilitó la adecuada discriminación entre bacterias vivas y muertas mediante las técnicas de tinción fluorescente empleadas.

A pesar de repetir los ensayos en diferentes tandas de muestras, el fenómeno de fluorescencia persistió, lo que imposibilitó obtener resultados cuantificables y confiables sobre la colonización bacteriana. Por este motivo, en la presente tesis no se reportan datos numéricos asociados a la evaluación de adherencia bacteriana, limitándose únicamente a señalar esta limitación experimental.

6 Conclusiones

Se logró modificar superficialmente la aleación AA 6063 mediante el proceso de anodizado en electrolito de etilenglicol y fluoruro de amonio, obteniéndose capas porosas con morfología homogénea y autoorganizada. La observación por microscopía electrónica de barrido confirmó la presencia de estructuras de alúmina típicas del anodizado, con poros distribuidos de forma regular y la incorporación de iones fluoruro en la capa anódica.

La caracterización electroquímica en una solución que simula el sudor humano mostró que, la aleación de aluminio 6063-T5 antes y después de anodizar presenta un comportamiento electroquímico similar.

La evaluación morfológica y composicional demostró que el proceso permitió la formación de superficies con mayor rugosidad y menor ángulo de contacto, lo que aumenta la mojabilidad y favorece la interacción con medios acuosos. Dichas características, junto con la confirmada presencia de fluoruro, constituyen un soporte para la funcionalización superficial con propiedades adicionales como la antibacteriana.

A pesar de los intentos realizados, no fue posible obtener resultados cuantitativos confiables en el ensayo de adherencia bacteriana, debido a la fluorescencia intrínseca de las muestras anodizadas que interfirió con la metodología de tinción.

En conjunto, los resultados confirman que el anodizado en electrolitos con fluoruro permite conservar el comportamiento frente a la corrosión de la aleación AA 6063, a la vez que introduce funcionalidades adicionales, cumpliendo los objetivos del trabajo y sentando bases para el desarrollo de recubrimientos antibacterianos más robustos.

7 Referencias Bibliográficas

- ASTM International. (2015). *ASTM G102-89(2015). Standard practice for calculation of corrosion rates and related information from electrochemical measurements.* <https://store.astm.org/g0102-89r15e01.html>
- Bard, A. J., & Faulkner, L. R. (2001). *Electrochemical methods: Fundamentals and applications* (2nd ed.). New York, NY: Wiley.
- Baron-Wiechec, A., Burke, M.G., Hashimoto, T., Liu, H., Skeldon, P., Thompson, G.E., Habazaki, H., Ganem, J.-J. and Vickridge, I.C. (2013) Tracer Study of Pore Initiation in Anodic Alumina Formed in Phosphoric Acid. *Electrochimica Acta*, 113, 302-312. <http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2013.09.060>
- Busscher, H. J., Rinastiti, M., Siswomihardjo, W., & van der Mei, H. C. (2012). Biofilm formation on dental restorative and implant materials. *Journal of Dental Research*, 91(10), 989–995. [10.1177/0022034510368644](https://doi.org/10.1177/0022034510368644)
- Concurrent Technologies Corporation. (2012). *Alternative metals study: Final report (Contract Number: TM-HQ-11-C-0049)*. United States Mint. <https://www.usmint.gov/content/dam/usmint/reports/ctcr-alternative-metals-study-2012-08-31.pdf?srsId=AfmBOopgFsg3KL8l4ExtwaRDfIyCKRaVrBp0FCxgbOobDSe8ML9Ghv11>
- Diggle, J. W., Downie, T. C., & Goulding, C. W. (1969). Anodic oxide films on aluminum. *Chemical Reviews*, 69(3), 365–405. <https://doi.org/10.1021/cr60259a005>
- Fontana, M. G. (2005). *Corrosion engineering* (3rd ed.). McGraw-Hill.

- Frankel, G. S. (1998). Pitting corrosion of metals: A review of the critical factors. *Journal of the Electrochemical Society*, 145(6), 2186–2198. <https://doi.org/10.1149/1.1838615>
- García, L. S. (2016). *Diagnostic medical parasitology* (6th ed.). ASM Press.
- García-Vergara, S. J., Skeldon, P., Thompson, G. E., & Habazaki, H. (2006). A flow model of porous anodic film growth on aluminium. *Electrochimica Acta*, 52(2), 681–687. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2006.05.054>
- Gómez Santos, G. (2002). *Flúor y fluorosis dental. Pautas para el consumo de dentífricos y aguas de bebida en Canarias* (p. 16). Gobierno de Canarias. https://www.gobiernodecanarias.org/sanidad/scs/content/2a4c0b6f-2e7a-11e2-8f6c-6560e5fbcd23/fluor_fluorosis_dental.pdf
- Jones, D. A. (1996). *Principles and prevention of corrosion* (2nd ed.). Prentice Hall.
- Macdonald, D. D. (2006). The history of the point defect model for the passive state: A brief review of film growth aspects. *Electrochimica Acta*, 52(27), 7576–7585. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2010.11.005>
- Madigan, M. T., Bender, K. S., Buckley, D. H., Sattley, W. M., & Stahl, D. A. (2018). *Brock biology of microorganisms* (15th ed.). Pearson.
- Mansfeld, F. (1990). Use of electrochemical impedance spectroscopy for the study of corrosion protection by polymer coatings. *Journal of Applied Electrochemistry*, 20(3), 488–496. <https://doi.org/10.1007/BF00262955>
- McCafferty, E. (2010). *Introduction to corrosion science*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0455-3>

- Medel-Plaza, M., Conde, A., de Damborenea, J. J., Aguilera-Correa, J. J., Esteban, J., & Arenas, M. A. (2024). Tailoring AA6063 for improving antibacterial properties. *Applied Surface Science Advances*, 19, 100574. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2024.100574>
- National Cancer Institute. (2022). *Fluoridated water fact sheet*. National Institutes of Health. <https://www.cancer.gov/about-cancer/causes-prevention/risk/myths/fluoridated-water-fact-sheet>
- Orazem, M. E., & Tribollet, B. (2017). *Electrochemical impedance spectroscopy* (2nd ed.). Hoboken, NJ: Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119363682>
- O'Sullivan, J. P., & Wood, G. C. (1970). The morphology and mechanism of formation of porous anodic films on aluminium. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 317(1531), 511–543. <https://doi.org/10.1098/rspa.1970.0129>
- Prusiner, S. B. (1998). Prions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 95(23), 13363–
- Sulka, G. D. (2008). Highly ordered anodic porous alumina formation by self-organized anodizing. In H. Masuda & K. Nishio (Eds.), *Nanostructured materials in electrochemistry* (pp. 1–116). Wiley-VCH. <https://doi.org/10.1002/9783527621507.ch1>
- Thompson, G. E. (1997). Porous anodic alumina: Fabrication, characterization and applications. *Thin Solid Films*, 297(1–2), 192–201. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(96\)09440-0](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(96)09440-0)
- Tobin, E. H., & Zahra, F. (2025). Nosocomial infections. In StatPearls [Internet]. StatPearls Publishing. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK559312/>
- Vargel, C. (2004). *Corrosion of aluminium*. Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/book/monograph/9780080444956/corrosion-of-aluminium#book-description>

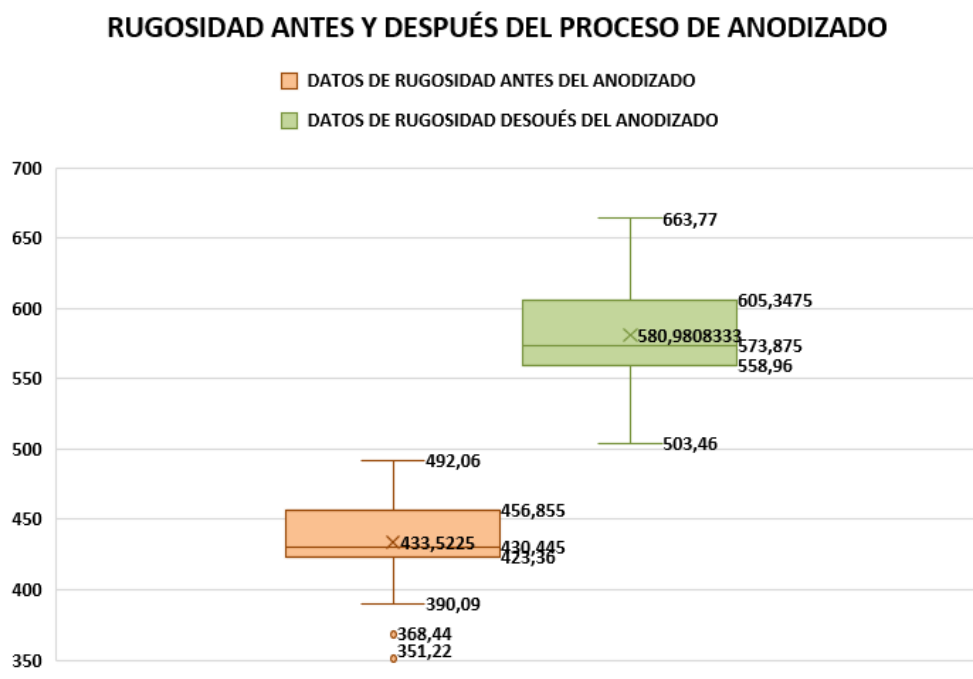
Zhao, L., Chu, P. K., Zhang, Y., & Wu, Z. (2014). Antibacterial coatings on titanium implants.

Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials, 91B(1), 470–480.

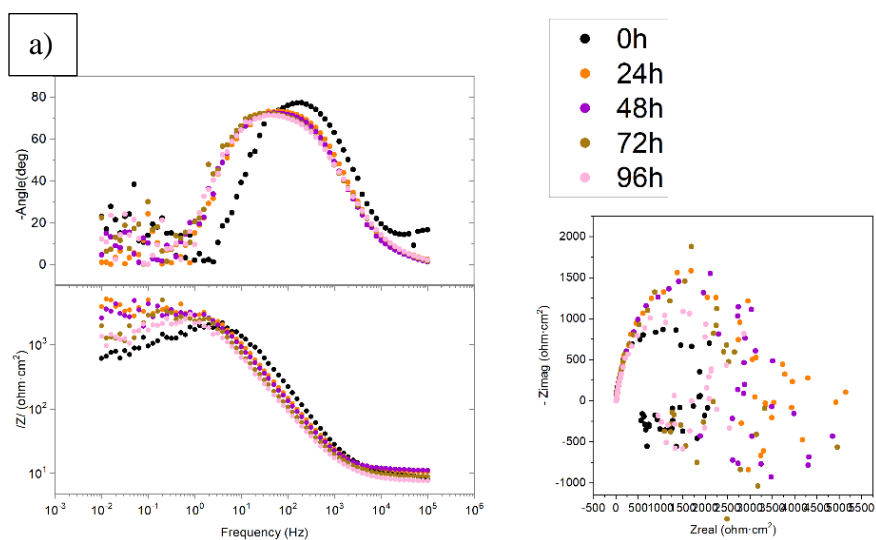
[10.1002/jbm.b.31463](https://doi.org/10.1002/jbm.b.31463)

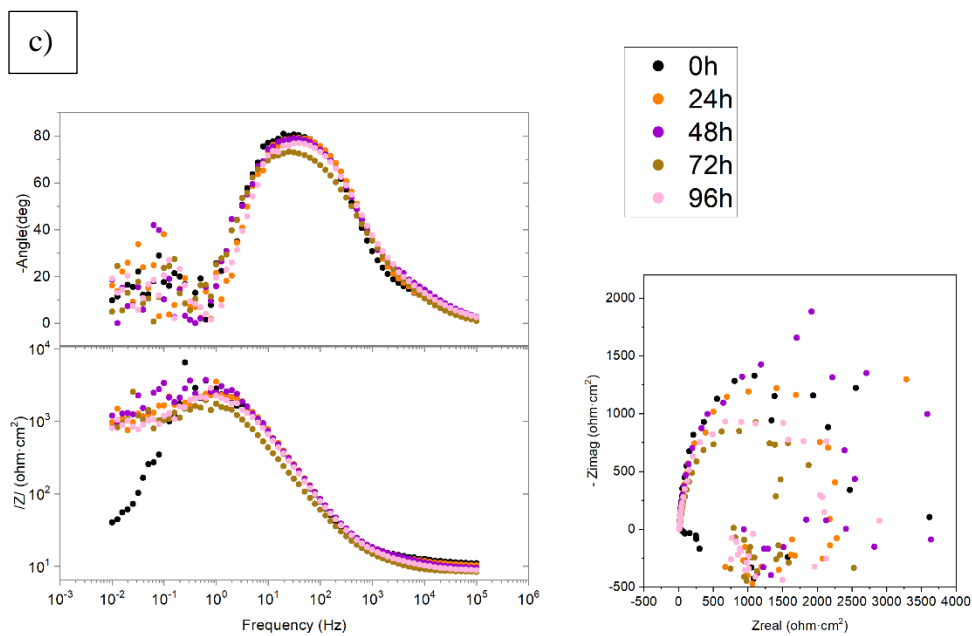
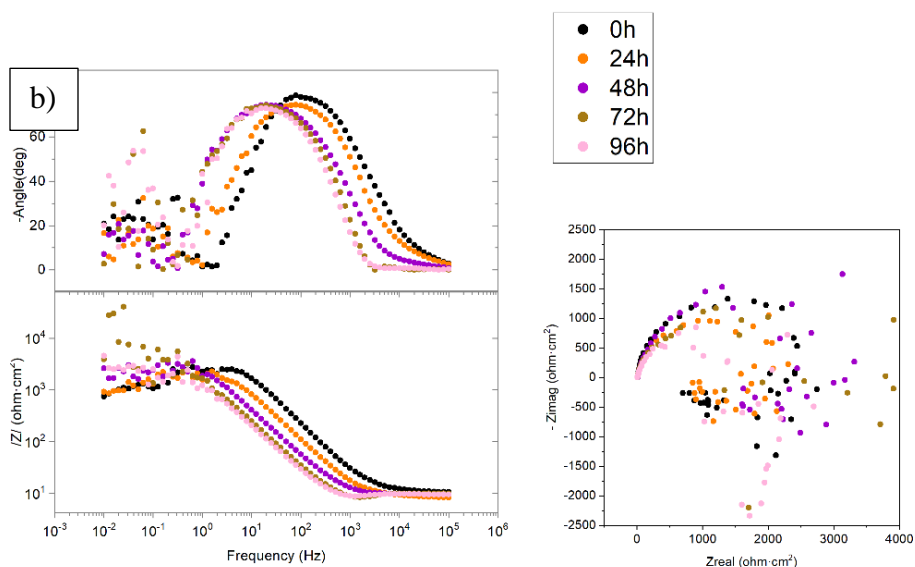
8 Apéndices

Apéndice A. Parámetros de rugosidad antes y después del proceso de anodizado



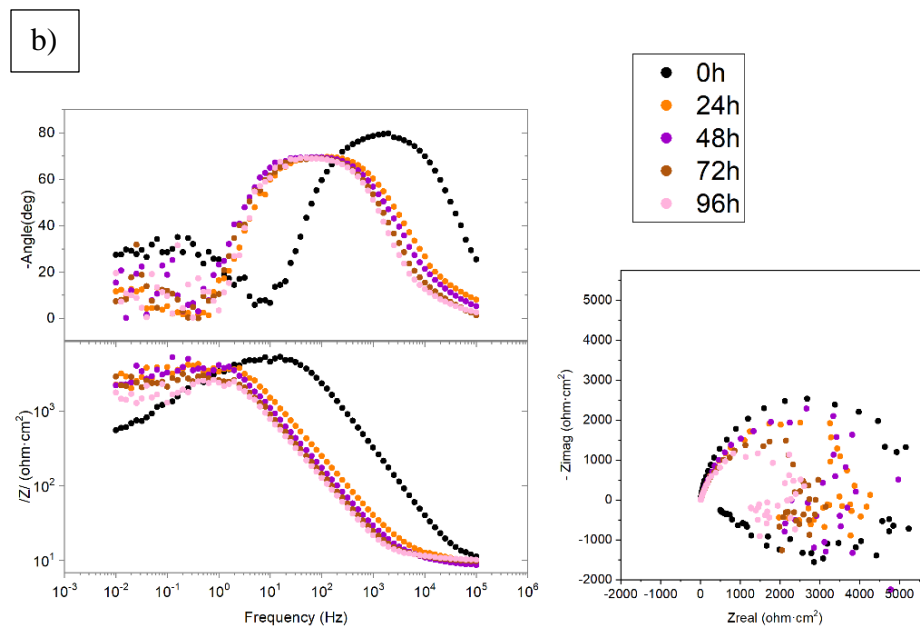
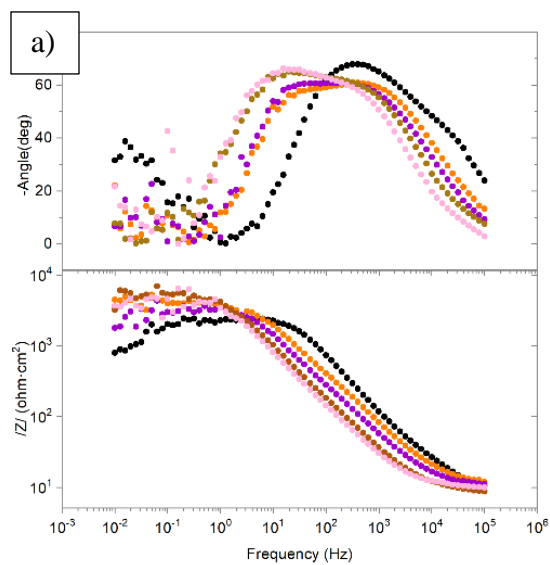
Apéndice B. Diagrama de Bode y Nyquist obtenidos en función del tiempo antes del proceso de anodizado

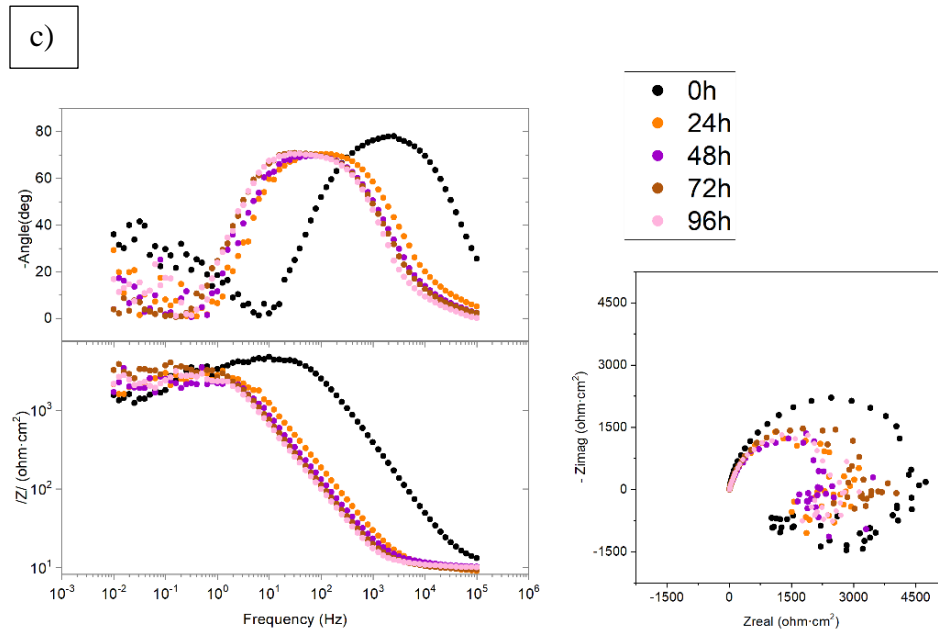




Nota; a) Muestra 1 b) muestra 2 c) muestra 3

Apéndice C. Diagrama de Bode y Nyquist obtenidos en función del tiempo después del proceso de anodizado





Nota; a) Muestra 1 b) muestra 2 c) muestra 3

Apéndice D. Parámetros electroquímicos obtenidos antes del proceso de anodizado.

Se obtuvieron partir del ajuste de los diagramas de impedancia mediante el software ZView 2 para las tres muestras analizadas *Se incluyen los valores de R1, CPE-T, CPE-P y R2, junto con los errores porcentuales, valores de Chi-squared y Sum of Sqr que validan la calidad del ajuste.*

Muestra 1										
	0 h	%Error	24 h	%Error	48 h	%Error	72 h	%Error	96 h	%Error
R1 ($\Omega\text{-cm}^2$)	9.923	2.4664	10.9	2.0059	11.37	2.2734	9.421	3.8129	8.076	3.7687
CPE1-T(F-s ^(p-1))	9.9973E-06	1.6636	2.1092E-05	1.3541	2.5358E-05	1.5709	3.213E-05	2.5974	3.9267E-05	2.5437
CPE1-P(F-s ^(p-1))	0.96045	0.8458	0.89519	0.6443	0.88364	0.7609	0.87738	1.2340	0.86911	1.2478
R2 ($\Omega\text{-cm}^2$)	1966	3.5001	3316	2.0531	3626	2.3566	3111	4.3574	2413	3.7911
Chi-Squared	0.0057236		0.0047849		0.0066457		0.016948		0.017204	
Sum of Sqr	0.14309		0.15312		0.21931		0.54234		0.60213	
Muestra 2										
	0 h	%Error	24 h	%Error	48 h	%Error	72 h	%Error	96 h	%Error
R1 ($\Omega\text{-cm}^2$)	11.67	3.0062	9.073	2.7525	9.645	3.6504	9.041	3.5127	9.138	3.5031
CPE1-T(F-s ^(p-1))	9.3418E-06	1.9948	2.391E-05	1.9952	5.4791E-05	2.8784	8.5544E-05	2.9946	8.576E-05	3.4513
CPE1-P(F-s ^(p-1))	0.94723	0.9388	0.91719	0.9732	0.90241	1.3520	0.91923	1.3738	0.95056	1.6880
R2 ($\Omega\text{-cm}^2$)	2625	3.1913	2048	3.1772	3803	6.1167	3206	4.6291	1368	5.4760
Chi-Squared	0.0099909		0.0098453		0.023979		0.032567		0.036674	
Sum of Sqr	0.26976		0.29536		0.7913		1.1724		1.2102	
Muestra 3										
	0 h	%Error	24 h	%Error	48 h	%Error	72 h	%Error	96 h	%Error
R1 ($\Omega\text{-cm}^2$)	13.19	3.1873	12.11	4.6595	12.1	4.1988	9.438	3.8874	10.78	4.7758
CPE1-T(F-s ^(p-1))	2.5549E-05	2.7484	2.1422E-05	3.9717	2.6867E-05	3.2357	5.4459E-05	3.0766	2.7324E-05	3.8702
CPE1-P(F-s ^(p-1))	0.96743	1.2890	0.97696	1.8221	0.93872	1.4577	0.88652	1.5155	0.94523	1.7747
R2 ($\Omega\text{-cm}^2$)	2629	4.7657	2446	6.5258	3689	5.3321	1846	5.0886	2111	5.4946
Chi-Squared	0.022747		0.046728		0.032072		0.024002		0.042531	
Sum of Sqr	0.68242		1.4018		0.99424		0.74405		1.3184	

Parámetros tomados antes del proceso de anodizado

Apéndice E. Parámetros electroquímicos obtenidos después del proceso de anodizado.

se obtuvieron a partir del ajuste de los diagramas de impedancia mediante el software ZView 2 para las tres muestras analizadas. Se incluyen los valores de R1, CPE-T, CPE-P, R2, CPE2-T, CPE2-P y R3 junto con los errores porcentuales, valores de Chi-squared y Sum of Sqr que validan la calidad del ajuste.

Muestra 1										
	0 h	%Error	24 h	%Error	48 h	%Error	72 h	%Error	96 h	%Error
R1 ($\Omega\text{-cm}^2$)	5.762	5.7935	10.88	4.4044	9.763	3.6521	8.366	3.3270	9.547	3.3282
CPE1-T ($F\text{-s}^{(p-1)}$)	2.9403E-06	2.3915	1.8290E-05	4.5954	1.3955E-05	4.6559	2.7577E-05	2.2579	2.8640E-05	4.1086
CPE1-P ($F\text{-s}^{(p-1)}$)	0.95643	4.7081	0.89299	0.3888	0.98155	4.6802	0.88698	0.5605	1.004	3.1964
R2 ($\Omega\text{-cm}^2$)	2203	4.0222	3699	3.1473	2740	4.7067	5248	2.5440	3301	4.1745
CPE2-T ($F\text{-s}^{(p-1)}$)	1.42E-04	3.6988	4.4869E-05	3.9675	5.649E-05	2.4302	1.68E-04	3.2722	1.12E-04	2.4140
CPE2-P ($F\text{-s}^{(p-1)}$)	0.54638	6.1902	0.6932	4.1389	0.68836	2.9777	0.65856	3.1008	0.69369	3.0841
R3 ($\Omega\text{-cm}^2$)	169.4	7.7220	391.1	7.7372	490.7	5.8568	229.7	7.8460	562.2	6.5649
Chi-Squared	0.002222		0.0051184		0.0052069		0.0043116		0.003474	
Sum of Sqr	0.068883		0.17914		0.18224		0.15953		0.12159	
Muestra 2										
	0 h	%Error	24 h	%Error	48 h	%Error	72 h	%Error	96 h	%Error
R1 ($\Omega\text{-cm}^2$)	9.187	5.8257	9.963	2.8558	8.982	3.2109	10.02	2.6977	10.56	2.3976
CPE1-T ($F\text{-s}^{(p-1)}$)	3.1975E-7	3.3686	9.3455E-06	3.9157	1.455E-05	4.6618	1.9526E-05	4.2109	1.7487E-05	3.6289
CPE1-P ($F\text{-s}^{(p-1)}$)	1.24	3.8216	1.208	3.9674	1.178	4.1441	1.16	4.1157	1.089	3.1978
R2 ($\Omega\text{-cm}^2$)	2503	2.0550	2240	2.3846	2469	2.8144	1778	2.3655	1944	2.7936
CPE2-T ($F\text{-s}^{(p-1)}$)	1.3424E-06	2.1088	2.4912E-05	1.5923	4.0162E-05	2.0766	4.2519E-05	2.1331	5.5646E-05	2.4810
CPE2-P ($F\text{-s}^{(p-1)}$)	0.90134	2.4772	0.80428	2.1391	0.7986	2.6404	0.81563	2.2027	0.82196	2.0373
R3 ($\Omega\text{-cm}^2$)	2003	2.9210	1499	4.4238	1165	4.9653	893.3	5.2746	315	5.2400
Chi-Squared	0.003754		0.0036564		0.0049097		0.0047849		0.0035181	
Sum of Sqr	0.10136		0.12066		0.16202		0.16747		0.1161	
Muestra 3										
	0 h	%Error	24 h	%Error	48 h	%Error	72 h	%Error	96 h	%Error
R1 ($\Omega\text{-cm}^2$)	11.12	6.7705	9.317	2.9430	10.43	1.9762	9.469	1.9505	10.22	1.4419
CPE1-T ($F\text{-s}^{(p-1)}$)	1.1756E-06	4.1435	1.3545E-05	2.9842	1.7302E+05	2.8654	2.5230E-05	2.4339	4.2286E-05	2.0081
CPE1-P ($F\text{-s}^{(p-1)}$)	0.89767	2.9993	1.042	2.5032	1.163	2.8899	1.045	1.9075	0.90042	0.2527
R2 ($\Omega\text{-cm}^2$)	2061	3.5005	2291	1.8038	1506	1.6392	2765	3.2297	2433	2.2187
CPE2-T ($F\text{-s}^{(p-1)}$)	5.1061E-07	4.3791	5.7733E-05	4.0512	4.9443E-05	1.7644	9.4170E-05	3.1821	0.00023208	3.2098
CPE2-P ($F\text{-s}^{(p-1)}$)	1.156	5.4476	0.77893	3.3600	0.81163	1.9378	0.7783	2.7227	0.79981	2.2711
R3 ($\Omega\text{-cm}^2$)	2390	2.8044	448.6	5.9784	679.2	3.1117	504.4	5.1090	496	4.1881
Chi-Squared	0.0039712		0.0033193		0.0028545		0.0023085		0.027936	
Sum of Sqr	0.09928		0.10954		0.099907		0.080798		0.97774	

Parámetros tomados después del proceso de anodizado