



**EDUCACIÓN**

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

# Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación  
y Desarrollo Tecnológico

## Tesis de Maestría

Evaluación de la vida a fatiga de aluminio recubierto  
sometido a cargas de amplitud constante

presentado por

**Ing. Isaac Gutiérrez Rojas**

como requisito para la obtención del grado de

**Maestro en Ciencias en Ingeniería  
Mecánica**

Director de tesis

**Dr. Arturo Abúndez Pliego**

Codirector de tesis

**Dr. José Martínez Trinidad**

Cuernavaca, Morelos, México. Septiembre de 2021.

## **Dedicatoria**

Dedico con todo mi corazón mi tesis a mi familia, principalmente a mis padres, Ricardo Gutiérrez y Angela Rojas Castillo, pues sin ellos no lo había logrado. Estoy eternamente agradecido por su arduo trabajo, esfuerzo, sacrificio y apoyo incondicional que me brindaron a lo largo de mi vida para convertirme en el hombre que soy. Por ser los que me inspiraron a confiar en mí mismo y, me motivaron en los días oscuros y difíciles.

A mis abuelos y hermanos, por creer siempre en mí, por brindarme su tiempo y apoyo incondicional en todo momento.

## **Agradecimientos**

Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACYT) por el apoyo otorgado a través de la beca No. CVU: 997639.

Al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) por abrirme las puertas para mi formación académica como profesional e investigador.

Al Doctor Arturo Abúndez Pliego por ser mi mentor, por la paciencia para conducirme hasta lograr culminar el posgrado y por asesorarme en todo momento.

Al Dr. Jorge Colín Ocampo, Dr. Andrés Blanco Ortega y Dr. Dariusz Szwedowics Wasik por formar parte del comité revisor que me ayudaron en este trabajo mediante observaciones objetivas y recomendaciones para mejorar el proyecto de tesis.

Al Dr. Jan Mayén Chaires por compartirme de su conocimiento y, por proporcionarnos equipo para la elaboración experimental de este trabajo y micrografías obtenidas en un microscopio óptico 3D.

A mis compañeros del grupo de trabajo de fatiga y materiales compuestos por hacer que las reuniones fueran amenas, por los consejos, recomendaciones y críticas constructivas para mejorar el trabajo.

A mi amigo German Alfonso por su gran amistad, apoyarme en momentos complicados y hacer amena la estancia en Cuernavaca.

A mis compañeros de generación (Agosto 2019 – Julio 2021), por brindarme su amistad y por los buenos momentos de convivencia.

A todo el personal que labora en CENIDET por su atención y apoyo.

# Índice

Dedicatoria.....	2
Agradecimientos.....	3
Nomenclatura.....	14
Resumen.....	15
Abstract.....	16
Introducción.....	17
CAPÍTULO 1.....	18
1. Estado del Arte.....	18
1.1 Influencia de los recubrimientos sobre la vida a fatiga de aleaciones de aluminio.....	19
1.2 Técnicas de deposición de recubrimientos de base carbón sobre aleaciones de aluminio.....	23
1.3 Técnica de electrodeposición.....	25
1.3.1 Efectos estáticos del recubrimiento de carbono por técnica de electrodeposición.....	26
1.3.2 Parámetros de técnica de electrodeposición para el recubrimiento de carbono.....	26
1.4 Rugosidad y tamaño de grano del recubrimiento de carbono.....	26
1.5 Caracterización de un revestimiento a base de C aplicado sobre una aleación AA6063.....	30
1.6 Número de ciclos (N) de fatiga del aluminio recubierto con carbono.....	30
1.7 Conclusión del estado del arte.....	33
CAPÍTULO 2.....	34
2. Planteamiento del problema.....	34
2.1 Justificación.....	37
2.2 Objetivos.....	38
2.2.1 General.....	38
2.2.2 Específicos.....	38
2.3 Alcances.....	38
2.4 Limitaciones.....	38
2.5 Metas.....	38

CAPÍTULO 3 .....	39
3. Marco Teórico .....	39
3.1 Espesor del recubrimiento en función al entorno electrolítico y rugosidad en función del espesor .....	39
3.2 Metodología de regresión lineal múltiple.....	41
3.3 Relación de incremento en la vida a fatiga .....	42
3.4 Electrolito para el control de corriente.....	42
CAPÍTULO 4 .....	44
4. Procedimiento experimental para el recubrimiento de carbono sobre aluminio 6061-T6 .....	44
4.1 Diseño del Experimento .....	44
4.1.1 Recubrimiento de Carbono por técnica de electrodeposición.....	46
4.1.2 Especificaciones y propiedades del material .....	47
4.1.3 Diseño geométrico de las probetas .....	48
4.1.4 Número de probetas .....	49
4.2 Equipo que se requiere .....	49
4.2.1 Tipo de carga .....	49
4.2.2 Equipo de ensayos de fatiga.....	49
4.2.3 Frecuencia de carga .....	51
4.2.4 Condición de fatiga (N) .....	51
4.2.5 Recubrimiento del material.....	51
4.3 Diseño paramétrico .....	52
4.4 Procedimiento experimental para el recubrimiento de carbono sobre la aleación de aluminio 6061-T6 .....	53
4.4.1 Modificaciones en el procedimiento experimental .....	58
CAPÍTULO 5 .....	61
5. Resultados y discusión .....	61
5.1 Fenómenos que influyen en la vida a fatiga del aluminio.....	70
5.1.1 Temperatura en el proceso de manufactura de las muestras.....	71
5.1.2 Temperatura en el proceso de maquinado .....	71
5.1.3 Temperatura en el proceso de pulido.....	72
5.1.4 Temperatura en el proceso de electrodeposición .....	72
5.1.5 Fragilización por hidrógeno.....	72

5.2	Caracterización de muestras.....	73
5.2.1	Rugosidad de las muestras de aluminio 6061-T6 .....	73
5.2.2	Espesor del recubrimiento .....	75
5.2.3	Análisis de las micrografías .....	76
5.2.4	Control de las variables de electrodeposición.....	78
5.3	Comparación del espesor del recubrimiento obtenido y fórmula de Faraday ....	83
	Conclusiones.....	85
	Actividades futuras .....	86
	Referencias Bibliográficas.....	87
	ANEXO A .....	91
	ANEXO B .....	101

## Lista de figuras

CAPÍTULO 1 .....	18
Figura 1.1 Representación esquemática de las 4 etapas del fenómeno de fatiga: etapa 1) nucleación de grieta, etapa 2) propagación de grietas, etapa 3) agrietamiento y etapa 4) falla del material. ....	18
Figura 1.2 Gráfica de los valores de dureza de los tres diferentes recubrimientos utilizados por Baragetti [1].....	20
Figura 1.3 Resultados de pruebas de fatiga de Arcieri, et al. [9].....	20
Figura 1.4 Reacción electroquímica general durante la deposición de DLC [3].....	21
Figura 1.5 Propiedades mecánicas (UTS) en función de los tratamientos térmicos realizados en la aleación Al 6061 [3].....	22
Figura 1.6 Se muestra curva de S-N en ensayos de fatiga por flexión rotativa en muestras 7075-T6 sin recubrimiento y recubiertas con DLC [10]. Las marcas negras representan los datos de [11], las marcas blancas a [12], las marcas grises a [9], la marca roja es un nuevo punto. ....	22
Figura 1.7 Procesos para la producción de recubrimientos, modificado de [13]. ....	23
Figura 1.8 Diagrama esquemático del proceso de electrodeposición, modificado de [13]..	25
Figura 1.9 Micrografías SEM de dos conjuntos de películas a dos potenciales aplicados de 2.13 volts (a, c, e) y 6.39 volts (b, d, f), de baños que contienen diferentes concentraciones (% vol.) de ácido fórmico en agua: (a, b) 0.5%, (c, d) 1% y (e, f) 10%. A una temperatura del baño de 300 [19]. ....	27
Figura 1.10 Micrografías SEM a potenciales aplicados de 4.26 volts, temperatura constante de 360 K y de baños que contienen diferentes concentraciones (% vol.) de ácido fórmico en agua: (a) 0.5%, (b) 1%, (c) 5% y (d) 10% [19]. ....	28
Figura 1.11 Micrografías SEM de cuatro películas representativas a una temperatura constante de 385 K del baño acético con dos contenidos diferentes de ácido acético a) tiempo de deposición de 30 min, voltaje aplicado de 2.13V y 0.5% v/v, b) tiempo de deposición 1 hora, voltaje aplicado de 2.13V y 0.5% v/v, c) tiempo de deposición de 1 hora, voltaje aplicado de 4.26V y 1% v/v y d) tiempo de deposición de 30 min, voltaje aplicado de 2.13V y 1% v/v [20]. ....	29
Figura 1.12 Rugosidad del recubrimiento en función del voltaje en el proceso de deposición [4] .....	30

Figura 1.13 Vida a fatiga del aluminio 6061-T6 recubierto con carbono vs modelo empírico, en función del tiempo para un voltaje de 15V de deposición [4] .....	31
Figura 1.14 Vida a fatiga del aluminio 6061-T6 recubierto con carbono vs modelo empírico, en función del voltaje para un tiempo constante de 1 hora de deposición [4].....	31
Figura 1.15 Vida a fatiga del aluminio 6061-T6 recubierto con carbono vs modelo empírico, en función de la corriente para un tiempo constante de 1 hora de deposición [4].....	32
Figura 1.16 Gráfica de superficie relacionando las variables de tiempo y voltaje [4] .....	32
CAPÍTULO 2 .....	34
Figura 2.1 Gráfica de superficie relacionando variables de tiempo y voltaje contra número de ciclos [4]. .....	35
Figura 2.2 Comportamiento del voltaje en el tiempo a una determinada corriente [4]. .....	35
CAPÍTULO 3 .....	39
Figura 3.1 Concentración de la deposición DLC en películas delgadas [25].....	40
Figura 3.2 Ilustración de variación de la rugosidad en función del espesor del recubrimiento DLC [25]. .....	41
Figura 3.3 Representación esquemático de la reacción electroquímica general durante la deposición de DLC [3]. .....	43
CAPÍTULO 4 .....	44
Figura 4.1 Consideraciones del diseño experimental. ....	45
Figura 4.2 Proceso de recubrimiento de carbono. ....	47
Figura 4.3 Dimensiones de la probeta en función del diámetro (d) [36].....	48
Figura 4.4 Representación de amplitud de carga alternante [38] .....	49
Figura 4.5 Esquema de máquina de fatiga por flexión rotativa tipo de Moore [39] .....	50
Figura 4.6 Esquema de la máquina de flexión rotativa y distribución de los elementos [4].	51
Figura 4.7 Diagrama esquemático del proceso de electrodeposición, modificado de [13].	52
Figura 4.8 Barras de aluminio 6061-T6 cortadas en tramos. ....	53
Figura 4.9 Torno CNC DYNAMACH. ....	54

Figura 4.10 Probetas de aluminio 6061-T6. ....	54
Figura 4.11 a) Celda diseñada en software de diseño CAD 3D para aplicar técnica de electrodeposición y b) celda impresa en plástico ABS.....	55
Figura 4.12 Proceso de pulido progresivo. ....	55
Figura 4.13 Grafito marca GENERAL´S modelo 982-2B. ....	56
Figura 4.14 a) Muestra la colocación de barras de grafito y muestra de aluminio, y b) muestra el ensamble de la celda electrolítica. ....	56
Figura 4.15 Fuente de energía B&K PRECISION 1672 corriente continua. ....	57
Figura 4.16 Máquina de fatiga por flexión rotativa.....	57
Figura 4.17 a) Sensor infrarrojo modelo TCRT5000 y b) placa Arduino Uno. ....	57
Figura 4.18 Probetas ensayadas.....	58
Figura 4.19 Pantalla del torno CNC DYNAMACH para velocidad de avance al 100%. ....	59
Figura 4.20 Pantalla del torno CNC DYNAMACH para velocidad de avance al 150%. ....	59
Figura 4.21 Sistema hidráulico para el control de temperatura en el proceso de electrodeposición.....	60
CAPÍTULO 5 .....	61
Figura 5.1 Gráfica de número de ciclos para cada condición.....	64
Figura 5.2 Número de ciclos a fatiga de todas las muestras.....	69
Figura 5.3 Número de ciclos a fatiga de muestras lijadas. ....	69
Figura 5.4 Efecto del lijado en la vida útil a fatiga.....	70
Figura 5.5 Mapa conceptual de los fenómenos que influyen en la vida a fatiga del aluminio. ....	71
Figura 5.6 Diagrama conceptual de las variables que influyen sobre la vida a fatiga.....	73
Figura 5.7 Micrografía 2D del aluminio 6061-T6 a) muestra SR-1 zona a y b) muestra SR-1 zona b.....	74
Figura 5.8 Micrografía 3D de la rugosidad del aluminio 6061-T6 de la muestra REV1. ....	75

Figura 5.9 Gráfica comparativa de espesores de cada condición. ....	76
Figura 5.10 Micrografías de dos películas representativas, recubiertas con ácido acético con concentración de 0.24% v/v controlando la tensión eléctrica a: a) 15v y b) 8V. ....	77
Figura 5.11 Micrografías de dos películas representativas, recubiertas con ácido acético con concentración de 0.24% v/v controlando la corriente eléctrica a 0.8A en un tiempo de: a) 2 horas y b) 3 horas. ....	77
Figura 5.12 Comportamiento de la variable no controlable para la condición VT15. ....	79
Figura 5.13 Comportamiento de la variable no controlable para la condición VT8. ....	79
Figura 5.14 Comportamiento de la variable no controlable para la condición IT2. ....	80
Figura 5.15 Comportamiento de la variable no controlable para la condición IT3. ....	81
Figura 5.16 Comportamiento de la temperatura para la condición VT15. ....	81
Figura 5.17 Comportamiento de la temperatura para la condición VT8. ....	82
Figura 5.18 Comportamiento de la temperatura para la condición IT2. ....	82
Figura 5.19 Comportamiento de la temperatura para la condición IT3. ....	83
ANEXO A .....	91
Figura A.1 Micrografía 2D del aluminio 6061-T6: a) muestra SR-1 zona (c), b) muestra SR-2 zona (a), c) muestra SR-2 zona (b), d) muestra SR-2 zona (c), e) muestra SR-3 zona (a), f) muestra SR-3 zona (b), g) muestra SR-3 zona (c) y h) muestra SR-4 zona (a). ....	91
Figura A.2 Micrografía 3D de la rugosidad del aluminio 6061-T6 de la muestra REV1 zona (c). ....	92
Figura A.3 Micrografía 3D de la rugosidad del aluminio 6061-T6 de la muestra REV2 zona (a). ....	92
Figura A.4 Micrografía 3D de la rugosidad del aluminio 6061-T6 de la muestra REV2 zona (b). ....	93
Figura A.5 Micrografía 3D de la rugosidad del aluminio 6061-T6 de la muestra REV2 zona (c). ....	93
Figura A.6 Micrografía 3D de la rugosidad del aluminio 6061-T6 de la muestra REV3 zona (a). ....	94

Figura A.7 Micrografía 3D de la rugosidad del aluminio 6061-T6 de la muestra REV3 zona (b). .....	94
Figura A.8 Micrografía 3D de la rugosidad del aluminio 6061-T6 de la muestra REV3 zona (c). .....	95
Figura A.9 Micrografía 3D de la rugosidad del aluminio 6061-T6 de la muestra REV4 zona (a). .....	95
Figura A.10 a) Micrografía 2D para: a) condición VT15 zona (a), b) condición VT15 zona (b), c) condición VT8 zona (a), d) condición VT8 zona (b), e) condición IT2 zona (a), f) condición IT2 zona (b), g) condición IT3 zona (a) y h) condición IT3 (b). .....	97
Figura A.11 Micrografía 3D del espesor del recubrimiento para la condición VT15 sobre la zona (a). .....	98
Figura A.12 Micrografía 3D del espesor del recubrimiento para la condición VT8 sobre la zona (a). .....	98
Figura A.13 Micrografía 3D del espesor del recubrimiento para la condición IT2 sobre la zona (a). .....	99
Figura A.14 Micrografía 3D del espesor del recubrimiento para la condición IT3 sobre la zona (a). .....	99
ANEXO B .....	101
Figura B.1 Programa para el conteo de número de ciclos para la máquina de flexión rotativa. ....	101
Figura B.2 Diagrama de conexiones (circuito eléctrico) del sensor inlarrojo modelo TCRT5000 para el contador de ciclos para la máquina de flexión rotativa de acuerdo con el programa escrito en la Fig. B.1. ....	101

## Lista de tablas

CAPÍTULO 1 .....	18
Tabla. 1.1 Diferentes tratamientos térmicos [3]. .....	21
CAPÍTULO 2 .....	34
CAPÍTULO 3 .....	39
CAPÍTULO 4 .....	44
Tabla 4.1 Composición química de la aleación de aluminio 6061-T6 [35] .....	48
Tabla 4.2 Propiedades mecánicas de la aleación de aluminio 6061-T6 [35]. .....	48
Tabla 4.3 Recubrimiento de carbono en función del voltaje y del tiempo. ....	53
Tabla 4.4 Recubrimiento de carbono en función de la corriente y del tiempo. ....	53
CAPÍTULO 5 .....	61
Tabla 5.1 Resultados de número de ciclos para la condición de referencia, sin recubrimiento (SR). ....	61
Tabla 5.2 Número de ciclos para la condición VT15. ....	62
Tabla 5.3 Número de ciclos para la condición VT8. ....	62
Tabla 5.4 Número de ciclos para la condición IT2. ....	63
Tabla 5.5 Número de ciclos para la condición IT3. ....	63
Tabla 5.6 Clasificación de colores del desempeño obtenido. ....	65
Tabla 5.7 Número de ciclos para las muestras sin recubrimiento (muestras lijadas en seco). .....	65
Tabla 5.8 Número de ciclos para las muestras sin recubrimiento sin pulir. ....	65
Tabla 5.9 Número de ciclos para las muestras con la condición VT. ....	66
Tabla 5.10 Número de ciclos para las muestras con la condición NIT2. ....	66
Tabla 5.11 Número de ciclos obtenidos vs número de ciclos de González [4]. ....	67

Tabla 5.12 Número de ciclos obtenidos en un tiempo de 20 minutos a 15V [4]. .....	67
Tabla 5.13 Número de ciclos obtenidos en un tiempo de 30 minutos a 15V. ....	67
Tabla 5.14 Número de ciclos obtenidos en un tiempo de una hora a 15V. ....	68
Tabla 5.15 Porcentaje de reducción de la vida a fatiga (NSR es la condición de referencia). .....	69
Tabla 5.16 Rugosidad promedio por cada muestra de aluminio 6061-T6 sin recubrimiento. .....	74
Tabla 5.17 Espesor del recubrimiento en tres zonas por condición. ....	76
Tabla 5.18 Cálculo matemático del espesor del recubrimiento para la condición IT2. ....	84
Tabla 5.19 Tabla comparativa de los datos de espesores obtenidos de forma experimental y matemática. ....	84
ANEXO A .....	91
Tabla A.1 Rugosidad en tres zonas por muestra del aluminio 6061-T6.....	96
Tabla A.2 Espesor del recubrimiento en tres zonas por condición. ....	100
ANEXO B .....	101

## **Nomenclatura**

$N$  – Número de ciclos.

$W$  – Masa de la sustancia producida en el electrodo, gramos ( $g$ ).

$I$  – Corriente involucrada, Amperes ( $A$ ).

$t$  – Tiempo de deposición, segundos ( $s$ ).

$M$  – Masa molar de la sustancia,  $g/mol$ .

$z$  – Número de electrones implicados en la reacción electroquímica.

$F$  – Constante de Faraday,  $96486 \text{ mol}^{-1}$ .

$V$  – Volumen, centímetros ( $cm^3$ ).

$\rho$  – Densidad del recubrimiento,  $g/cm^3$ .

$A$  – Área de trabajo, centímetros ( $cm^2$ ).

$x$  – Espesor del recubrimiento, micrómetros ( $\mu m$ ).

$\sigma_A$  – Esfuerzo generado en la probeta sobre la sección media, MPa.

$Q$  – Carga, Newton ( $N$ ).

$d_{AB}$  – Distancia entre chumaceras de apoyo y tensora, metros ( $m$ ).

$r$  – Radio de la sección media de la probeta, metros ( $m$ ).

## Resumen

En este trabajo se presenta la evaluación del efecto de los parámetros del proceso de electrodeposición sobre la calidad del recubrimiento de tipo carbono en una aleación de Al 6061 T6 y su vida útil a fatiga. La aleación se recubrió con una película delgada de carbono utilizando ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) al 0.24% como electrolito en una celda de electrodeposición con barras de grafito modelo 982-B2 como electrodos. Las variables de entrada del proceso de electrodeposición fueron el tiempo de deposición, el voltaje y la corriente, mientras que las variables observadas del recubrimiento fueron el espesor y la rugosidad, así como la vida útil a fatiga de la aleación. Las probetas se prepararon de acuerdo a la norma ASTM E466-96, las cuales se recubrieron, se analizaron por microscopía 3D y posteriormente se ensayaron en una máquina de flexión rotativa tipo Moore, a una frecuencia de 29 Hz con una carga de amplitud constante, hasta la fractura. A través de un análisis comparativo de los espesores adquiridos de forma experimental con la fórmula de Faraday, se logró obtener una similitud. Los resultados muestran que: 1) el pulido de las muestras afecta negativamente la vida a fatiga de la aleación, a causa del efecto de la flexión y el calor generado por la fricción durante la realización del mismo; 2) la fragilización generada a través del proceso de electrodeposición cuando el hidrógeno tiene una interacción con la superficie del sustrato y penetra la estructura cristalina del metal base.

## **Abstract**

This work presents the evaluation of the effect of the parameters of the electrodeposition process on the quality of the carbon-type coating in an Al 6061 T6 alloy and its fatigue life is presented. The alloy was coated with a carbon thin film using 0.24% acetic acid ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) as electrolyte in an electrodeposition cell with model 982-B2 graphite rods as electrodes. The input variables of the electrodeposition process were the deposition time, voltage and current, while the observed variables of the coating were the thickness and roughness, as well as the fatigue life of the alloy. The specimens were prepared according to the ASTM E466-96 standard, which were coated, analyzed by 3D microscopy and subsequently tested in a Moore-type Rotating Bean Fatigue Test System at a frequency of 29 Hz with a constant amplitude load, until the fracture. Through a comparative analysis of the experimentally acquired thicknesses with the Faraday formula, a similarity was obtained. The results show that: 1) the polishing of the samples negatively affects the fatigue life of the alloy, due to the effect of bending and the heat generated by friction during its performance; 2) the embrittlement generated through the electrodeposition process when hydrogen has an interaction with the surface of the substrate and penetrates the crystalline structure of the base metal.

## Introducción

La fatiga es un fenómeno de degradación de las propiedades mecánicas o debilitamiento del material, la cual provoca daños progresivos y localizados en el sustrato cuando se somete a cargas repetitivas. Generalmente, en fatiga de altos ciclos (HCF, por sus siglas en inglés) las fallas se originan en la superficie de los materiales por imperfecciones. Esto produce nucleación de grietas en materiales metálicos que comúnmente inician en el interior del material; cuando las grietas crecen, los materiales se fracturan.

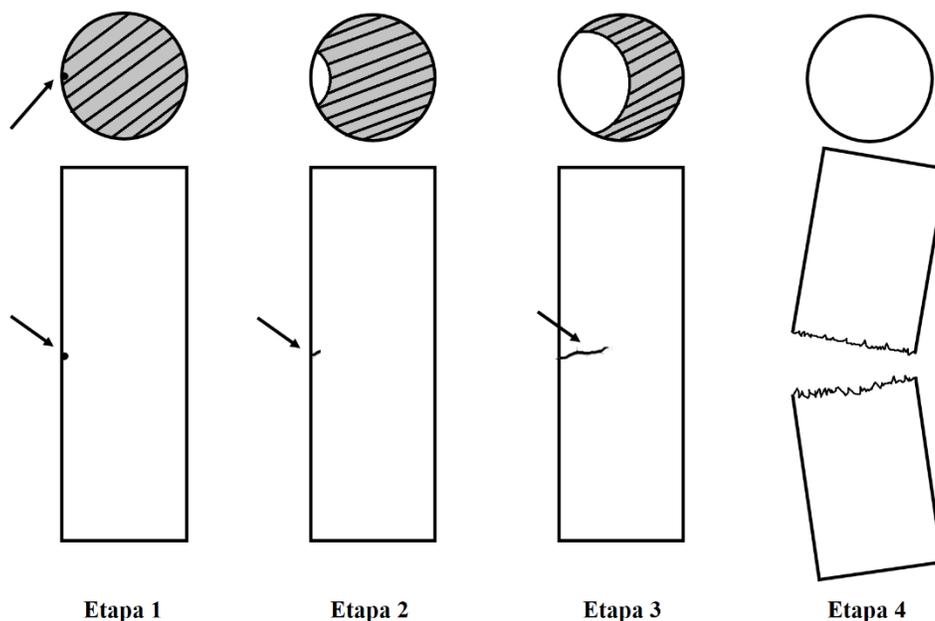
Las aleaciones de aluminio son, sin duda, materiales esenciales con muchas aplicaciones en la industria, principalmente en dos campos: la aeroespacial y automotriz. Dichas aleaciones exhiben algunas propiedades superiores a aquellas del acero, como la densidad y la resistencia a la corrosión. Sin embargo, sus propiedades mecánicas como el comportamiento a la fatiga, la resistencia al desgaste, la dureza superficial y la capacidad de carga son a menudo inferiores. Para mejorar sus propiedades mecánicas o igualarlas a las del acero de construcción tradicional, se aplica un recubrimiento duro [1]. En la industria, los componentes mecánicos fallan frecuentemente por diversos motivos, tales como: cargas extremas, errores en el uso, propiedades superficiales insuficientes, entre otros. Por esta razón, se aplican recubrimientos duros en los sustratos para aumentar la vida a fatiga de esos componentes [2].

Existen diferentes técnicas para aplicar recubrimientos duros en un material base. Entre las técnicas más comunes utilizadas en las investigaciones, se puede encontrar: a) deposición física de vapor (PVD por sus siglas en inglés), b) deposición química de vapor (CVD por sus siglas en inglés) y c) procesamiento láser de haz de iones. Sin embargo, una técnica en particular, nombrada electrodeposición, es simple, sostenible y de bajo costo para la aplicación de películas de carbono [3], [4], [5]. En este trabajo, se propone hacer una búsqueda de antecedentes de investigaciones de los efectos del recubrimiento DLC y grafito en material base de aleación de aluminio, así como la evaluación de la vida a fatiga del material sometido a diferentes valores de las variables del recubrimiento, las cuales resultan de la aplicación de la técnica de electrodeposición.

## 1. Estado del Arte

El ingeniero alemán Wilhelm August Julius Albert, publicó los primeros resultados de pruebas de fatiga. Albert fue un funcionario de las minas en Hannover Alemania, se dio cuenta que las cadenas transportadoras presentaban fallas frecuentemente y construyó una máquina de pruebas para analizar las cadenas que habían presentado fallas[6], [7].

En un manual de ASM Volumen 19 [8], el estudio de fatiga y crecimiento de grietas, ha despertado el interés de muchos investigadores. Con el desarrollo de más de 50 años, se ha dado un progreso continuo en la mecánica. El proceso de fatiga es un fenómeno complejo para estudiar, pero conforme pasan los años se ha dado un avance en la comprensión de la degradación de las propiedades mecánicas, producto de la aplicación de cargas cíclicas. De acuerdo con el manual de ASM, el fenómeno de fatiga se puede dividir en 4 etapas distintas: 1) nucleación de grieta, 2) propagación de grietas, 3) agrietamiento y 4) falla del material (en la Figura 1.1 se muestra las 4 etapas de forma esquemática).

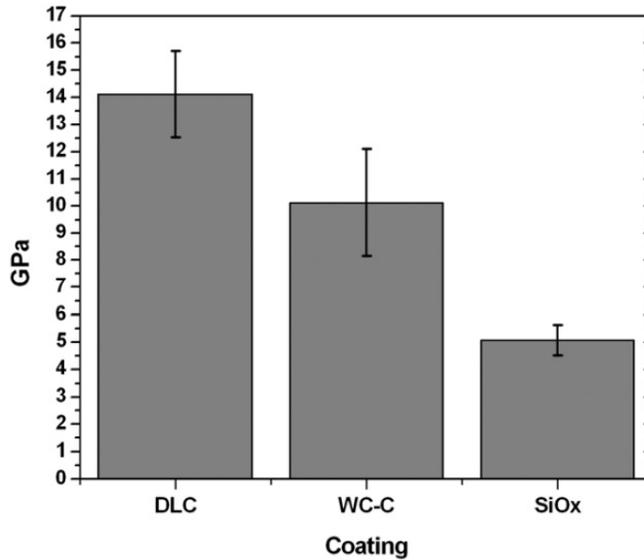


**Figura 1.1** Representación esquemática de las 4 etapas del fenómeno de fatiga: etapa 1) nucleación de grieta, etapa 2) propagación de grietas, etapa 3) agrietamiento y etapa 4) falla del material.

## 1.1 Influencia de los recubrimientos sobre la vida a fatiga de aleaciones de aluminio

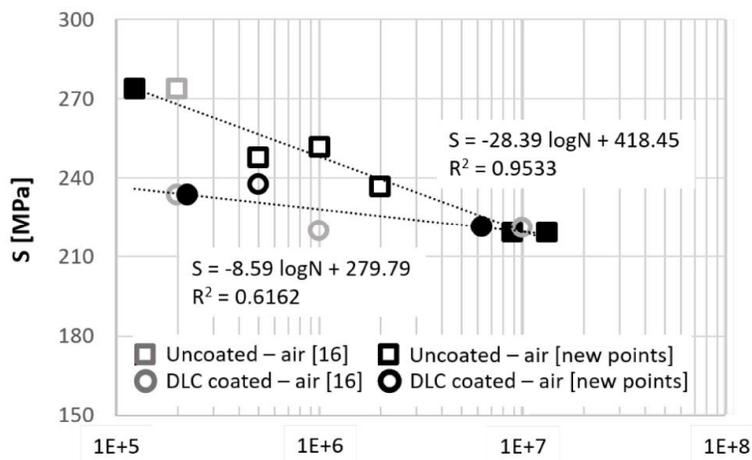
En muchas aplicaciones de la industria, existen máquinas que están en contacto con otros materiales y/o sustancias, que pueden provocar desgaste, corrosión, debilitamiento del material, esto es un problema muy grave para la industria, porque alguna falla del material puede ser muy costosa. Sin embargo, existe un proceso llamado recubrimiento o revestimiento que consiste en depositar material en la superficie del sustrato (material en constante contacto), que tiene como finalidad mejorar las propiedades mecánicas del material base, tales como, dureza, resistencia al desgaste, resistencia a la corrosión, resistencia a la fatiga, entre muchas más dependiendo de la técnica de deposición y el material del recubrimiento.

Durante los últimos años, se han hecho algunas investigaciones sobre la influencia que tienen los recubrimientos sobre la vida a fatiga de aleaciones de aluminio. Entre los trabajos que se intentó relacionar los recubrimientos con la fatiga se puede citar el de Baragetti, *et al.* [1], quienes en el 2009 analizaron la influencia de los recubrimientos sobre la vida a fatiga de la aleación de aluminio 2011-T6, empleando dos diferentes técnicas de deposición, que fueron: deposición química de vapor (CVD) y deposición física de vapor (PVD). Utilizaron tres diferentes recubrimientos: carbono tipo diamante mejor conocido como *Diamond Like Carbon* (sus siglas en inglés DLC), SiO<sub>x</sub> (óxido de silicio) y Carburo de Tungsteno/Carbono (WC/C). Con base en sus resultados, concluyeron que aplicando un recubrimiento WC/C por medio de la técnica de deposición CVD y PVD, se obtuvo una ligera mejoría del 10% en el límite de fatiga. En los recubrimientos de DLC y SiO<sub>x</sub> se obtuvo un incremento menos significativo del 5%. Sin embargo, esperaban que el recubrimiento DLC tuviera efectos más significativos sobre la vida a fatiga (ver Figura 1.2) porque posee características mayores en tensiones de compresión residuales que el recubrimiento WC/C.



**Figura 1.2** Gráfica de los valores de dureza de los tres diferentes recubrimientos utilizados por Baragetti [1].

Otro de los trabajos es el de Arcieri, *et al.* [9], quienes estudiaron la influencia de la aleación de aluminio 7075-T6. Ellos se enfocaron únicamente en el revestimiento de DLC, para el recubrimiento de las muestras emplearon solamente la técnica de deposición PVD y para los ensayos de fatiga realizaron las pruebas en una máquina de flexión rotativa (cuando el valor del coeficiente de asimetría es  $R = -1$ ). Concluyeron que el recubrimiento DLC presenta efectos positivos de tensiones residuales. Sin embargo, en la resistencia a la fatiga cuando son superiores a  $1 \times 10^7$  ciclos para las muestras no tuvieron efectos positivos y consideraron que puede deberse a efectos térmicos cuando se hace una interacción mecánica entre el recubrimiento y el sustrato (ver Figura 1.3).

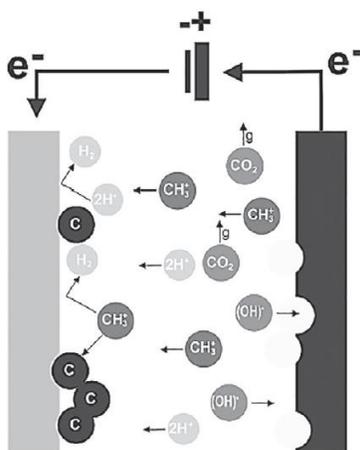


**Figura 1.3** Resultados de pruebas de fatiga de Arcieri, et al. [9].

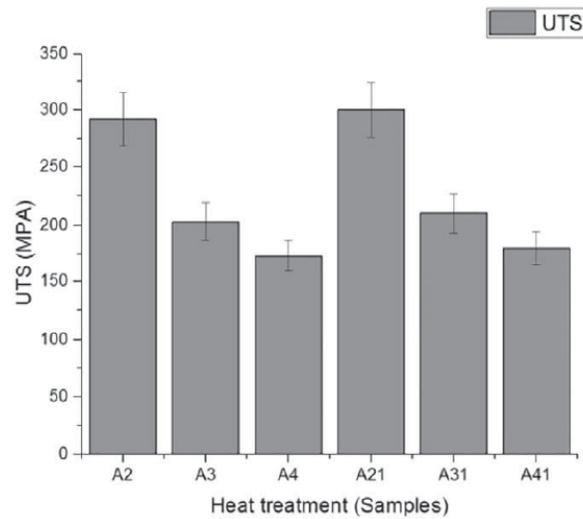
Posteriormente Mayén, *et al.* [3], en el 2017 trabajaron con aleación de aluminio 6061-T6 sometido a tratamiento térmico (ver Tabla. 1.1) y emplearon la técnica de electrodeposición para el recubrimiento de DLC, quienes utilizaron tres diferentes tipos de electrolitos sostenibles: 1)  $\text{CH}_3\text{COOH}$  al 5% que se obtiene del jugo de caña (Ax-DLC); 2)  $\text{CH}_3\text{COOH} + \text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6 + \text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 + \text{NaHCO}_3$  (Ax-Na-DLC); y 3)  $\text{CH}_3\text{COOH}$  al 5% para anodización y depósito de DLC (Ax- $\text{Al}_2\text{O}_3$ -DLC). Los resultados que obtuvieron fueron efectos positivos en dos electrolitos, Ax-DLC y Ax-Na-DLC, presentaron mayor resistencia a la corrosión. Concluyeron que, mejorar las propiedades mecánicas depende del tratamiento térmico aplicado en la aleación 6061. En la Figura 1.4 se muestra una representación esquemática de la reacción electroquímica general durante la electrodeposición de DLC. En el tratamiento térmico de A2 y A21 (ver la Tabla 1.1) se obtuvieron mejores propiedades mecánicas (UTS), como se muestra en la Figura 1.5. Además, demostraron que se puede recubrir con un electrolito  $\text{CH}_3\text{COOH}$  que es sostenible y de bajo costo para depositar recubrimientos DLC.

**Tabla. 1.1** Diferentes tratamientos térmicos [3].

Sample	Ageing (°C)	Retgression (°C)	Re-ageing (°C)
T6	-	-	-
A2	200	250	-
A3	250	300	-
A4	300	350	-
A21	200	250	150
A31	250	300	150
A41	300	350	150

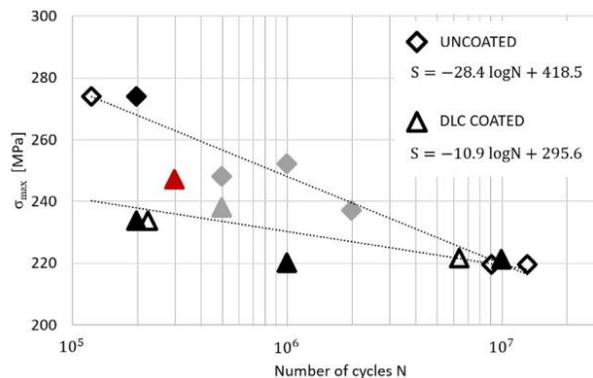


**Figura 1.4** Reacción electroquímica general durante la deposición de DLC [3].



**Figura 1.5** Propiedades mecánicas (UTS) en función de los tratamientos térmicos realizados en la aleación Al 6061 [3].

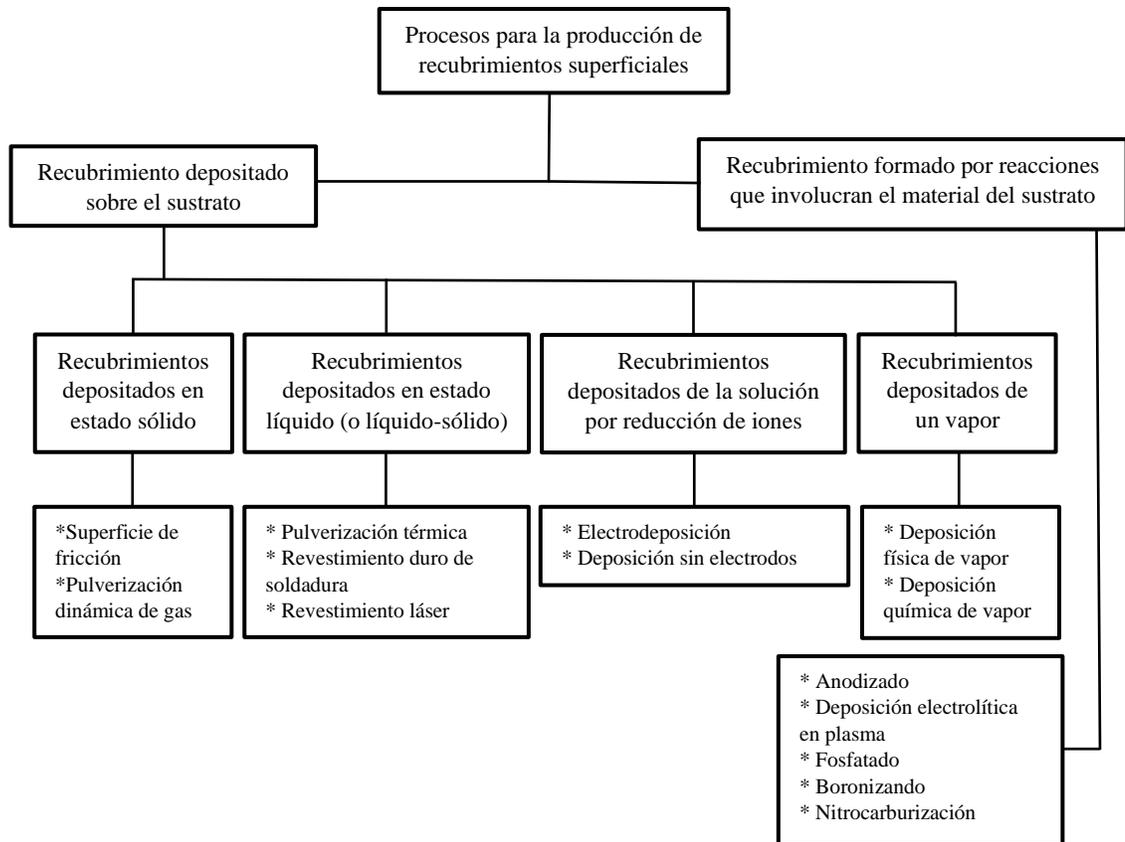
Recientemente, Baragetti, *et al.* [10] analizaron la influencia de la deposición del recubrimiento DLC por la técnica de PVD sobre la resistencia a la fatiga de la aleación de aluminio 7075-T6. Hicieron pruebas de flexión rotativa por fatiga del aluminio con recubrimiento y sin recubrimiento. Los resultados que obtuvieron fueron comparados con trabajos anteriores (ver Figura 1.6), y se presentó una reducción en la resistencia a la fatiga del aluminio recubierto con una pérdida del 15% a los  $2 \times 10^5$  ciclos debido a la carga aplicada. Sin embargo, obtuvieron resultados dispersos, y concluyeron que esto se debe a una adhesión no completa del recubrimiento sobre el sustrato.



**Figura 1.6** Se muestra curva de S-N en ensayos de fatiga por flexión rotativa en muestras 7075-T6 sin recubrimiento y recubiertas con DLC [10]. Las marcas negras representan los datos de [11], las marcas blancas a [12], las marcas grises a [9], la marca roja es un nuevo punto.

## 1.2 Técnicas de deposición de recubrimientos de base carbón sobre aleaciones de aluminio

Existen diferentes procesos para producir recubrimientos superficiales. Shipway [13] describió que cada proceso es distinto y presenta diferentes características como: espesor, dureza, ductilidad y el estado de tensión residual. En la Figura 1.7 se muestra la clasificación del proceso de recubrimiento complementado con sus diferentes técnicas para recubrir.



**Figura 1.7** Procesos para la producción de recubrimientos, modificado de [13].

De acuerdo con algunos autores como Baragetti [1], Wheeler [14], o Bull [15] la técnica PVD se caracteriza por alta dureza que sobrepasa los 3000 HV, relevante acabado superficial (cercano al del sustrato) y alta pureza. La deposición tiene un rango de temperatura de 150<sup>0</sup>C a 500<sup>0</sup>C, es decir, aprueba la deposición en algunos materiales metálicos. Es resistente al desgaste, a la corrosión, asimismo, tiene alta estabilidad química y térmica. Además, la técnica CVD comparte generalmente buena adhesión, y del sustrato se puede aumentar la resistencia

al desgaste y corrosión. También, ambas técnicas presentan una ligera mejoría en el límite de fatiga.

La técnica de electrodeposición, se caracteriza por ser simple, sostenible y de bajo costo y ofrece protección contra la corrosión [3]. Las cualidades de esta técnica son: buena adherencia del material base con el recubrimiento aplicado, un buen brillo visual, superficie lisa (sin rugosidades), exento de porosidades, alta dureza, aumenta la resistencia a la corrosión [16]. Sin embargo, no existe un estudio definido sobre los efectos que presenta la técnica sobre materiales dúctiles.

Shipway [13] describió que los espesores del revestimiento que puede lograr la técnica de electrodeposición (depende del material que se va a recubrir), normalmente oscilan entre 5 y 250  $\mu\text{m}$  (aunque en algunos materiales, se pueden lograr espesores mucho más altos). De igual manera mencionó que los recubrimientos se depositan normalmente a partir de soluciones a no más de 90°C y estas bajas temperaturas rara vez tienen algún efecto sobre el sustrato. La preocupación de tal técnica, es la absorción de hidrógeno atómico en el sustrato y la fragilización resultante por el hidrógeno. Para minimizar el riesgo de daño por fragilización por hidrógeno (para el acero) se recomienda tratar térmicamente después del recubrimiento. Julve [16] mencionó los factores o parámetros influyentes en la electrodeposición y susceptibles de ser controlados, un factor muy importante es la temperatura, la cual, al aumentarse facilita la difusión y la disminución de temperatura puede anular el desprendimiento de hidrógeno sobre el cátodo.

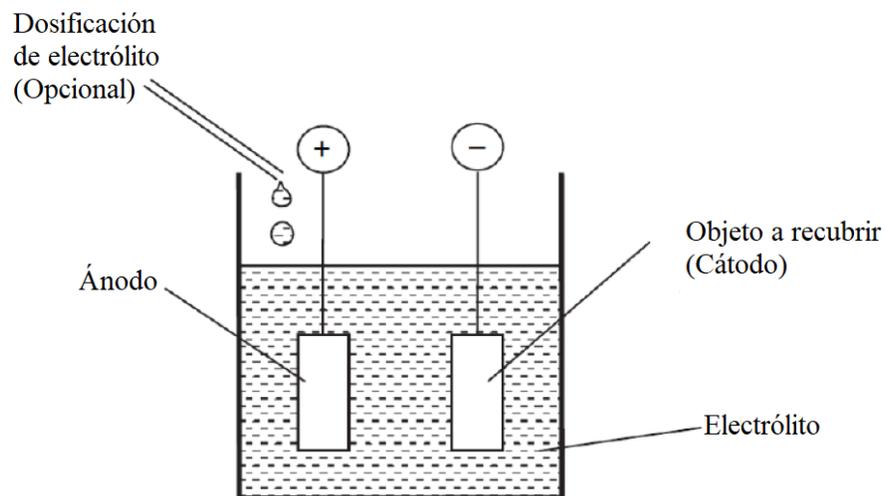
Existen diferentes técnicas para el recubrimiento, sin embargo, los métodos electroquímicos tienen la ventaja de un buen control del espesor y la morfología del depósito, y generalmente se llevan a cabo a presión atmosférica, la temperatura oscila entre un rango de 20 a 90°C [17].

Ramírez [18] en su tesis doctoral, buscó encontrar la correlación entre diferentes tipos y espesores de anodizado con la respuesta a fatiga en la aleación de aluminio 7075-T6. Ramírez ensayó las muestras en una máquina de flexión en cuatro puntos y utilizó la técnica de anodizado por electrolitos que contienen componentes orgánicos. Concluyó que todos los tratamientos de anodizado disminuyen la resistencia a fatiga con respecto a la aleación de referencia, y menciona que los recubrimientos anódicos mejoran la resistencia a la corrosión, pero reducen la respuesta a fatiga del aluminio.

### 1.3 Técnica de electrodeposición

Y. Namba [5] fue el primer investigador en aplicar recubrimiento DLC por la técnica de electrodeposición a sustratos de silicio. Con su investigación, despertó el interés de utilizar tal técnica.

En la técnica de electrodeposición, se consideran dos factores principales, el electrolito y las variables (tiempo, voltaje y corriente). La superficie de interés, tiene que ser eléctricamente conductora y se convierte en el cátodo (carga negativa). Por otro lado, el recubrimiento (material a depositar) se convierte en ánodo (carga positiva). En la Figura 1.8 se observa un diagrama esquemático de lo que se necesita para llevar a cabo la técnica de electrodeposición. Los espesores varían entre 5 y 250 $\mu\text{m}$  dependiendo del material y el tiempo (cabe mencionar que es posible que en algunos materiales se puede obtener mayor espesor). El material base (sustrato), debe estar perfectamente limpio. El electrolito es una sustancia que contiene en su composición iones libres y hace que se comporte como un conductor eléctrico [13], [16].



**Figura 1.8** Diagrama esquemático del proceso de electrodeposición, modificado de [13].

### **1.3.1 Efectos estáticos del recubrimiento de carbono por técnica de electrodeposición**

Mayén, *et al.* [3] utilizaron aleación de aluminio 6061 y recubrieron con DLC por la técnica de electrodeposición. Compararon tres electrolitos distintos, de los cuales destacan dos de ellos que presentaron una mejor protección contra la corrosión: Ax-DLC y Ax-Na-DLC.

Gupta, Pal Chowdhury y Pal [19], hicieron un estudio específicamente sobre la caracterización de sus muestras, depositaron recubrimiento DLC por la técnica de electrodeposición sobre sustrato de vidrio, usando ácido fórmico y agua como electrolito. Como resultado obtuvieron que la película aplicada en el sustrato es compacta con una superficie bastante lisa.

### **1.3.2 Parámetros de técnica de electrodeposición para el recubrimiento de carbono**

Como ya se mencionó, el recubrimiento sobre un material base ayuda a mejorar propiedades mecánicas. Una técnica en particular nombrada electrodeposición, es un procedimiento en el cual sus parámetros pueden ser manipulados (tiempo, voltaje y corriente). Al manipularlos, presenta cambios en el espesor de la película y el tamaño del grano [4], [20]. Sin embargo, para obtener resultados positivos para que la película del recubrimiento DLC sea compacta y homogénea, debe tener un control en los parámetros.

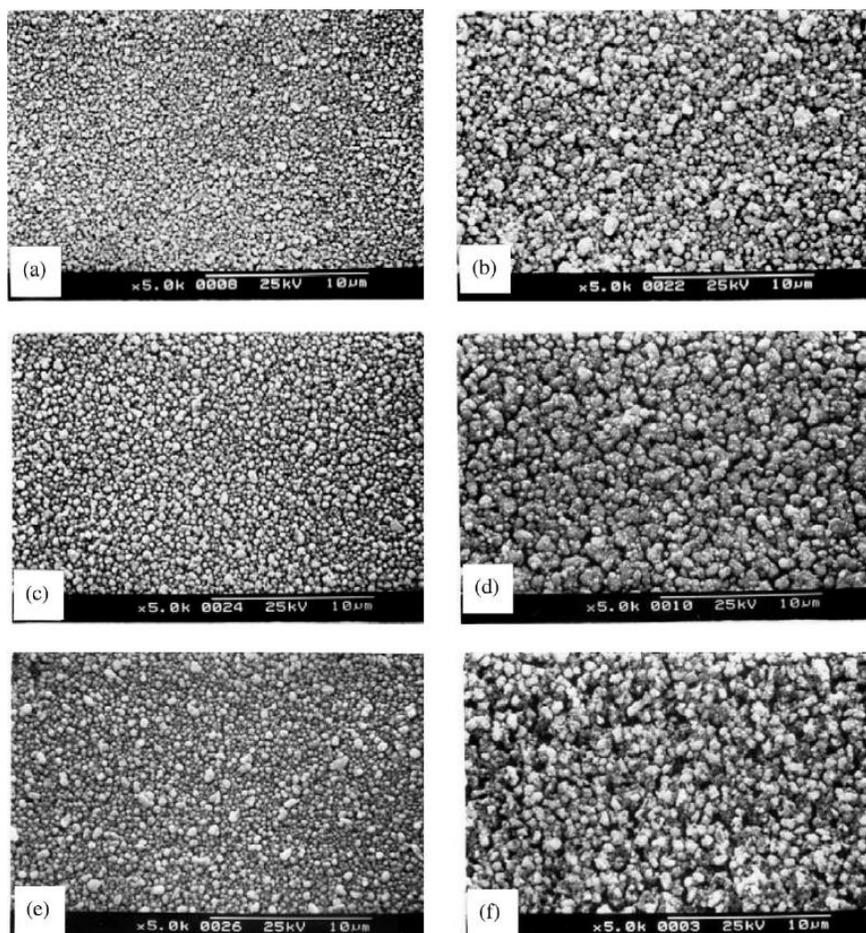
Roy, *et al.* [21], Gupta, *et al.* [20], Paul, *et al.* [22], Hassannejad, *et al.* [23] y Mayén, *et al.* [3] comparten una metodología similar, utilizando ácido fórmico o ácido acético  $CH_3COOH$  como electrolito, aplicando bajo nivel de energía de 2.5-30V, el cual corresponde a las densidades entre 3-40  $mA/cm^2$ .

## **1.4 Rugosidad y tamaño de grano del recubrimiento de carbono**

Las variables más importantes del recubrimiento son la rugosidad y tamaño de grano, que son de mayor importancia para la evaluación de la vida a fatiga del material. Gupta *et al.* [19] depositaron por técnica de electrodeposición usando ácido fórmico y agua desionizada como electrolito. Las películas se depositaron sobre sustrato de vidrio recubiertos con  $SnO_2$ . La cantidad de ácido fórmico en agua varió de 0.5 a 10% v/v y la deposición lo realizaron a una temperatura constante de 360 K. La lámina de grafito se usó como el ánodo, y la distancia

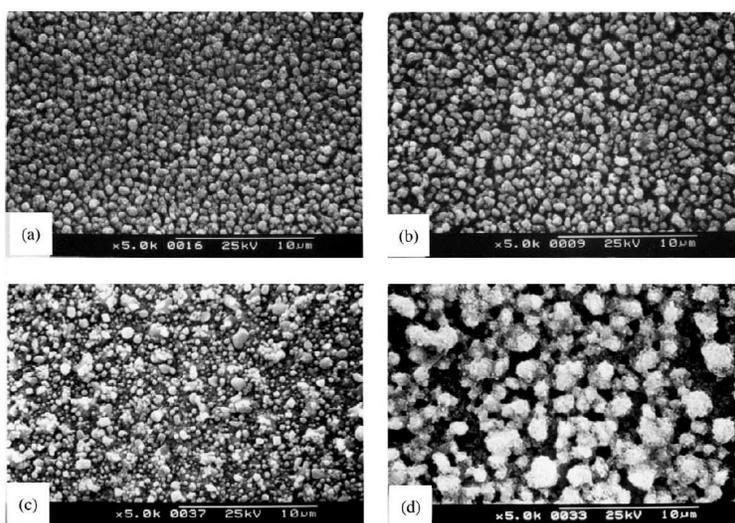
entre las superficies del ánodo y el cátodo fue de 0.7 cm utilizando voltajes bajos entre 2 y 6 V.

En las micrografías SEM obtenidas por Gupta *et al.* [19] (ver Figura 1.9) se muestra la estructura del recubrimiento y el tamaño de grano; para obtener el recubrimiento aplicó dos voltajes diferentes, uno de 2.13 V y otro de 6.39 V, tres baños diferentes que contienen ácido fórmico al 0.5%, 1% y 10% en agua desionizada, y la temperatura se mantuvo constante a 300 K. En las Figuras 1.9a, 1.9c y 1.9e la estructura de grano son muy compactas en comparación con las películas depositadas a un potencial más alto (ver Figuras 1.9b, 1.9d y 1.9f). Concluyeron que el tamaño de grano se ve incrementado cuando las películas se depositan a un voltaje más alto y demostraron que es posible aplicar películas de DLC con bajo voltaje.



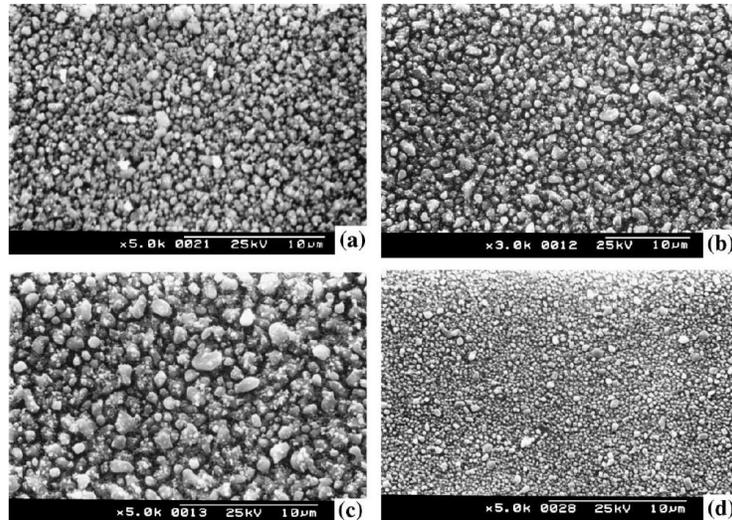
**Figura 1.9** Micrografías SEM de dos conjuntos de películas a dos potenciales aplicados de 2.13 volts (a, c, e) y 6.39 volts (b, d, f), de baños que contienen diferentes concentraciones (% vol.) de ácido fórmico en agua: (a, b) 0.5%, (c, d) 1% y (e, f) 10%. A una temperatura del baño de 300 [19].

En las micrografías SEM obtenidas por Gupta *et al.* [19] se muestra la estructura del recubrimiento y se puede observar el tamaño del grano (ver Figura 1.10); para obtener el recubrimiento aplicó 4.26 V en cuatro baños diferentes que contienen ácido fórmico al 0.5%, 1%, 5% y 10% en agua desionizada a una temperatura constante de 360 K. De los resultados obtenidos, concluyen que la temperatura tuvo efectos sobre la microestructura de las películas. Lograron observar un crecimiento de grano significativo debido al aumento de la temperatura del baño y que el aumento de la concentración de ácido fórmico en el baño provoca huecos más grandes sobre las películas.



**Figura 1.10** Micrografías SEM a potenciales aplicados de 4.26 volts, temperatura constante de 360 K y de baños que contienen diferentes concentraciones (% vol.) de ácido fórmico en agua: (a) 0.5%, (b) 1%, (c) 5% y (d) 10% [19].

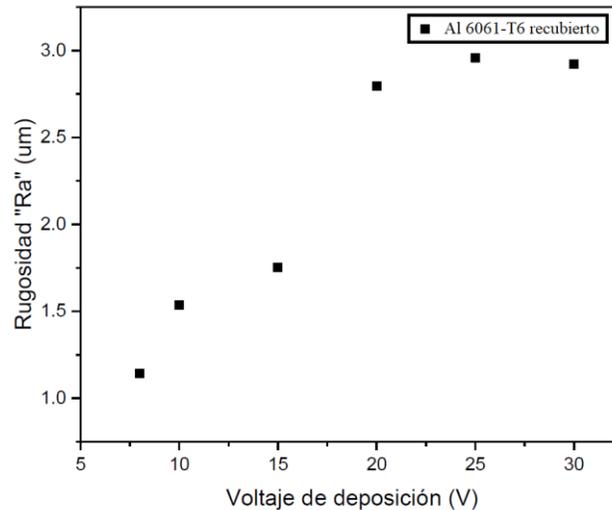
Gupta *et al.* [20] depositaron por técnica de electrodeposición películas de DLC sobre sustratos de vidrio recubiertos con  $\text{SnO}_2$  usando una mezcla de ácido acético y agua desionizada. El voltaje aplicado fue de 2.13 y 4.26 V, en dos volúmenes diferentes de ácido acético mientras la temperatura del baño se mantuvo a 358 K. Utilizaron una lámina de grafito como ánodo y, la distancia entre el ánodo y el vidrio recubierto con  $\text{SnO}_2$  fue de 0.7cm. El espesor de las películas varió entre 0.5 y 1  $\mu\text{m}$ .



**Figura 1.11** Micrografías SEM de cuatro películas representativas a una temperatura constante de 385 K del baño acético con dos contenidos diferentes de ácido acético a) tiempo de deposición de 30 min, voltaje aplicado de 2.13V y 0.5% v/v, b) tiempo de deposición 1 hora, voltaje aplicado de 2.13V y 0.5% v/v, c) tiempo de deposición de 1 hora, voltaje aplicado de 4.26V y 1% v/v y d) tiempo de deposición de 30 min, voltaje aplicado de 2.13V y 1% v/v [20].

La Figura 1.11 muestra las micrografías SEM obtenidas por Gupta *et al.* [20], se observa la estructura del recubrimiento y el tamaño de grano en dos baños diferentes que contienen 0.5% (Figuras 1.11a y 1.11b) y 1% (Figuras 1.11c y 1.11d) de ácido acético, voltaje de 2.13V (Figuras 1.11a, 1.11b y 1.11d) y voltaje de 4.26 V (Figura 1.11c), por último, la temperatura se mantuvo constante a 358 K. En las Figuras 1.11a y 1.11b la superficie de la película es rugosa, sin embargo, en la Figura 1.11c la rugosidad se vio incrementada, esto se debe al aumento del tiempo de deposición y del voltaje. En la Figura 1.11d obtuvo tamaños de granos más pequeños y bien definidos.

González [4] muestra una gráfica de rugosidad (ver Figura 1.12), en la cual es posible observar que la rugosidad aumenta en función del voltaje. Los recubrimientos presentaron mayor rugosidad en comparación al material sin recubrimiento. Sin embargo, la vida a fatiga es mayor, y menciona que es posible a causa de la restricción del movimiento del material y sellado de los defectos superficiales o cerca de la superficie.



**Figura 1.12** Rugosidad del recubrimiento en función del voltaje en el proceso de deposición [4].

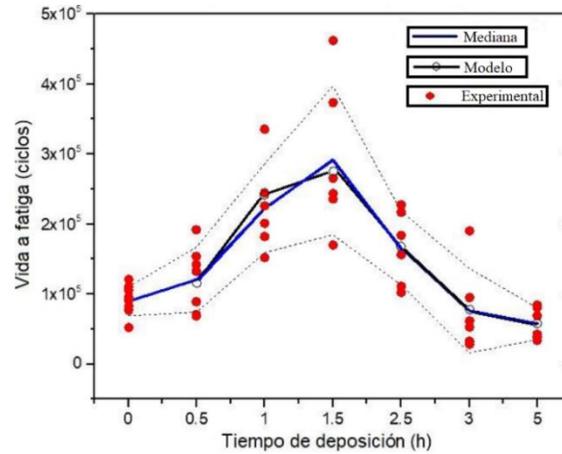
### **1.5 Caracterización de un revestimiento a base de C aplicado sobre una aleación AA6063**

Gallegos-Melgar *et al.* [24] recubrieron a base de carbono aplicando técnica de electrodeposición sobre aleación AA6063 en muestras planas y cilíndricas para caracterizar la estructura y microestructura del recubrimiento junto con pruebas de rendimiento de fatiga y corrosión. Concluyeron que el recubrimiento que obtuvieron corresponde a nanofibras de carbono y/o grafito policristalino y obtuvieron resultados positivos respecto a la vida a fatiga del material hasta alcanzar un 100% en comparación del material de referencia obteniendo un espesor crítico de  $3.9\mu\text{m}$  y  $20.5\mu\text{m}$  de rugosidad.

### **1.6 Número de ciclos (N) de fatiga del aluminio recubierto con carbono**

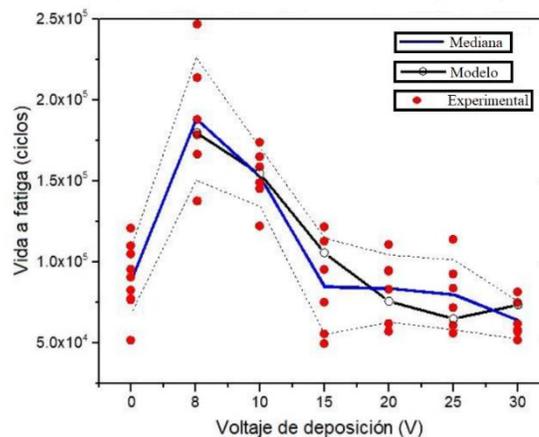
González [4] presentó un estudio paramétrico del efecto del recubrimiento del carbono sobre la vida a fatiga del aluminio 6061-T6 de forma experimental. Determinó la técnica de electrodeposición para el recubrimiento de las muestras, utilizando una solución de ácido acético con concentración de 0.24% v/v y las variables manipuladas fueron: el tiempo, voltaje y corriente. Las probetas recubiertas con carbono fueron ensayadas en una máquina de fatiga tipo Moore y los ensayos fueron hasta la fractura. González utilizó 6 condiciones distintas para cada variable de prueba (tiempo, voltaje y corriente). Uno de los parámetros que González controló fue el tiempo, la electrodeposición se llevó a cabo a temperatura ambiente y, el tiempo varió entre 0.5 horas y cinco horas a un voltaje constante de 15V. En la Figura

1.13 se muestra que el recubrimiento de carbono en el proceso de deposición de 1.5 horas con voltaje de alimentación constante de 15V tiene un efecto positivo en la vida a fatiga del material en comparación del material de referencia.



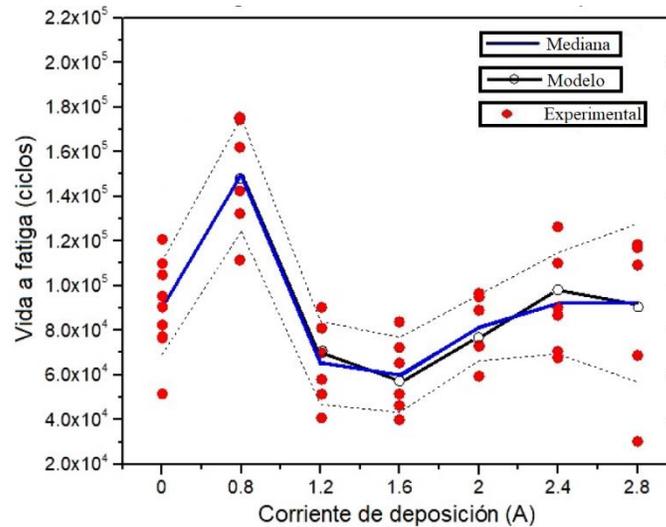
**Figura 1.13** Vida a fatiga del aluminio 6061-T6 recubierto con carbono vs modelo empírico, en función del tiempo para un voltaje de 15V de deposición [4].

González también estudió el efecto de la variación del voltaje usado en el proceso de electrodeposición sobre la vida a fatiga; la electrodeposición se llevó a cabo a temperatura ambiente y el voltaje varió entre 8 y 30V durante una hora. En la Figura 1.14 se muestra que el recubrimiento de carbono en el proceso de deposición de una hora, con voltaje entre 8 y 10V de alimentación tiene un efecto positivo en la vida a fatiga en comparación del aluminio 6061-T6 sin recubrimiento. La condición con mejor desempeño ante la fatiga fue utilizando 8V de alimentación.



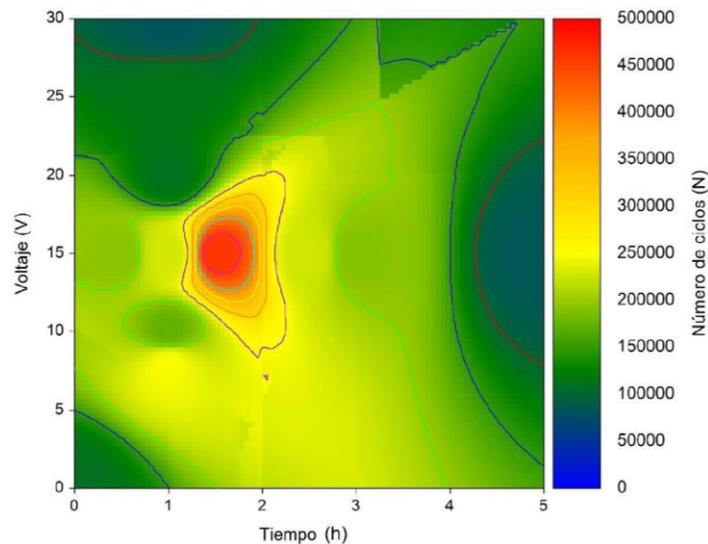
**Figura 1.14** Vida a fatiga del aluminio 6061-T6 recubierto con carbono vs modelo empírico, en función del voltaje para un tiempo constante de 1 hora de deposición [4].

Por último, el parámetro que estudió fue el de corriente, el recubrimiento de carbono en el proceso de deposición fue de una hora en un rango de corriente de 0.8 y 2.8A. La Figura 1.15 muestra que la condición con mayor desempeño ante la fatiga fue utilizando 0.8A de alimentación.



**Figura 1.15** Vida a fatiga del aluminio 6061-T6 recubierto con carbono vs modelo empírico, en función de la corriente para un tiempo constante de 1 hora de deposición [4].

González realizó, de acuerdo con sus resultados, una gráfica en la cual relacionó los parámetros de tiempo y voltaje contra números de ciclos (ver Figura 1.16). La gráfica de colores muestra que la mejor condición se encuentra entre los valores de voltaje de 10 y 20V en un tiempo de 1.5 y 2 horas, para poder lograr obtener un mayor número de ciclos entre  $4 \times 10^5$  y  $5 \times 10^5$ .



**Figura 1.16** Gráfica de superficie relacionando las variables de tiempo y voltaje [4].

## 1.7 Conclusión del estado del arte

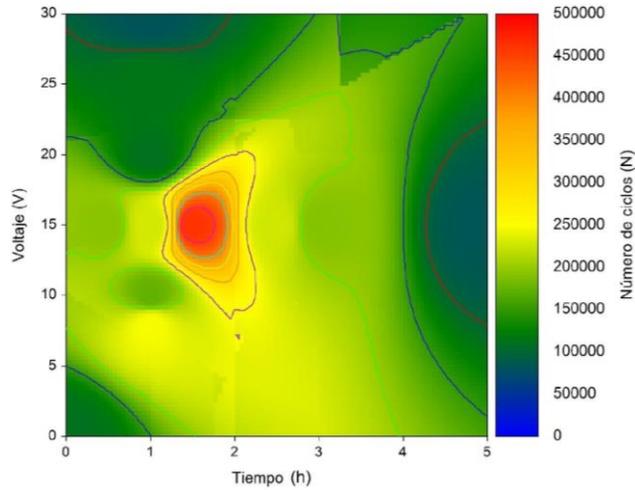
Es evidente la necesidad de seguir investigando sobre los efectos de la aleación de aluminio recubierto con carbono y su influencia sobre la vida a fatiga. Cabe resaltar, que varios investigadores afirman que el recubrimiento de carbono posee características de tensiones residuales positivas. Sin embargo, en diversas investigaciones al evaluar la vida a fatiga de tal recubrimiento sobre aleaciones de aluminio no presentan resultados favorables, pero concluyen que eso se debe a la técnica aplicada.

Esto abre las puertas para seguir trabajando e investigando con recubrimientos de carbono, por ser un recubrimiento muy prometedor por sus propiedades semejantes al diamante, para aumentar la vida a fatiga del sustrato. De acuerdo con el estado del arte, las técnicas de recubrimientos como CVD y PVD, presentan resultados no favorables en la vida a fatiga y los autores concluyen que se debe a su escasa adherencia. Consideraron que puede deberse a efectos térmicos cuando se hace una interacción mecánica entre el recubrimiento y el sustrato. La técnica de electrodeposición comparte cualidades, entre las más destacadas: buena adherencia del material base con el recubrimiento aplicado, un buen brillo visual, superficie lisa, exento de porosidades, alta dureza y aumenta la resistencia a la corrosión. Así mismo, también sus variables de tiempo, voltaje y corriente pueden ser manipuladas, de tal manera que se puede obtener un espesor de la película y el tamaño del grano distinto. Otra de las ventajas de tal técnica, es un proceso simple, sostenible y de bajo costo. Sin embargo, se requiere el estudio del recubrimiento por técnica de electrodeposición sobre aleaciones de aluminio porque diferentes autores presentan resultados distintos, esto se cree que se debe a diversos fenómenos e incluyendo la naturaleza de la fatiga sobre materiales dúctiles.

### 2. Planteamiento del problema

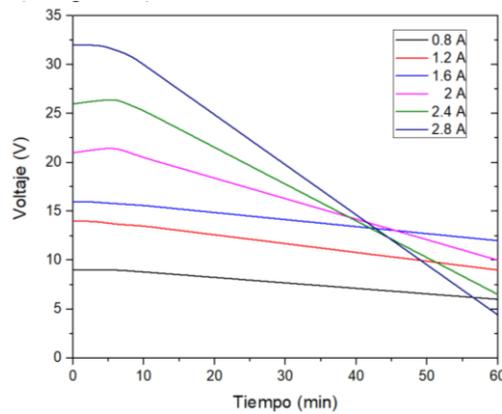
Existe evidencia de que las variables del proceso de deposición tienen una influencia considerable en la calidad del recubrimiento y, a su vez, en la vida a fatiga de las aleaciones de aluminio. Manipular las variables de tiempo, voltaje y corriente, presentan cambios en el espesor de la película y el tamaño del grano. Para lograr un resultado positivo en la calidad del recubrimiento, se debe tener un control en los parámetros. Gupta *et al.* [19], demostraron que las películas se pueden obtener a un voltaje aplicado muy bajo. El tamaño del grano se ve incrementado cuando las películas se depositan a un voltaje más alto (la rugosidad aumenta cuando se aumenta el voltaje). Salvadori *et al.* [25], concluyen que la rugosidad se subestima y la concentración de esfuerzos por rugosidad superficial tiene una probabilidad mínima para los recubrimientos de mayor espesor.

González [4] en el 2019, investigó sobre la influencia del recubrimiento de carbono sobre aleación de aluminio 6061-T6, en la cual, reportó diagramas que relacionan las variables de tiempo y voltaje del proceso de deposición contra el número de ciclos a la falla por fatiga. González adquirió resultados que indican que las variables que influyen en mayor medida sobre la vida a fatiga del material son: tiempo y voltaje. Los puntos de recomendación para obtener un mayor número de ciclos (N) es que el voltaje oscile entre  $10V < Volts < 20V$  y un tiempo entre  $1.5h < T < 2h$ . Considerando los resultados de González, se espera que aplicando un voltaje de 15V en un tiempo de 1.63 horas se obtenga un mejor resultado en cuanto a cantidad de números de ciclos (N) con valores esperados de entre 450000 a 500000 de esta manera tener un mejor desempeño de la vida a fatiga del material (ver Figura 2.1). Así mismo, se espera obtener un espesor de recubrimiento mayor y evaluar el tamaño de grano. Sin embargo, a pesar de obtener esos resultados, González obtuvo valores dispersos cuando se sometió el recubrimiento a los siguientes parámetros: 1 hora de deposición con un voltaje constante de 15V.



**Figura 2.1** Gráfica de superficie relacionando variables de tiempo y voltaje contra número de ciclos [4].

De igual manera, González [4], cuando la variable controlada era la corriente, obtuvo resultados de agrietamiento menor. Sin embargo, no fue el que mejor desempeño obtuvo. Pero sólo consideró un tiempo de una hora para todas las pruebas de la variable controlada (corriente). Por consiguiente, considero que extendiendo el tiempo de la prueba puede aumentar el número de ciclos (N). En la Figura 2.2 se muestra una gráfica del comportamiento del voltaje en el tiempo para cada corriente controlada y se observa que, en el transcurso del tiempo, el voltaje disminuye. Sin embargo, cuando la corriente es de 0.8A, 1.2A y 1.6A, el voltaje disminuye en una cantidad pequeña, y se considera que, extendiendo el tiempo de la prueba se puede obtener un mejor resultado aumentando el espesor del recubrimiento. De acuerdo con los datos reportados por González cuando controló la corriente, la condición que presentó un mejor desempeño sobre la vida a fatiga del material base fue el de 0.8A y por este motivo se desea trabajar con esta condición.



**Figura 2.2** Comportamiento del voltaje en el tiempo a una determinada corriente [4].

Recientemente Gallegos *et al* [24], en sus resultados estructurales y microestructurales descartaron la formación de un recubrimiento DLC en las muestras de aluminio. Sin embargo, confirmó la formación de grafito policristalino, que no ha sido reportado previamente en la literatura, y que potencia la vida a fatiga de metales y aleaciones. El recubrimiento obtenido aumenta la vida a fatiga hasta en un 100% en comparación con la aleación sin recubrimiento. Sin embargo, diferentes autores como Julve [16] y Casapia [26] mencionaron que el fenómeno de fragilización por hidrógeno en la técnica de electrodeposición en materiales dúctiles como el aluminio está presente. Por esta razón, se cree que González [4] en su investigación obtuvo variaciones en sus resultados. Si las muestras recubiertas presentan menor vida a fatiga respecto al material de referencia, el principal fenómeno que influye en la reducción de la vida a fatiga es: la fragilización por hidrógeno.

## 2.1 Justificación

El fenómeno de fatiga se presenta mayormente en componentes móviles que están en contacto con otros materiales y/o sustancias. Las fallas estructurales son muy costosas y el 95% de las fallas ocurren por fatiga [27]. Por esa razón, se requiere estudiar el fenómeno de fatiga, comprender la mecánica de fractura y desarrollar materiales que sean más resistentes a la fatiga [28].

En el mercado de materiales, la competencia por la calidad, propiedades mecánicas y precio, cada vez es mayor. El reemplazo de materiales pesados como es el acero por materiales ligeros como es el aluminio es posible [29]. Algunos autores [1] mencionan que el aluminio puede tener propiedades similares o mejores que las del acero, pero para ello es necesario que se aplique un recubrimiento al sustrato.

El recubrimiento de carbono, es al momento, la mejor opción para aumentar la resistencia a la fatiga, desgaste, oxidación. Provee alta dureza superficial, bajo coeficiente de fricción (utilizándose como lubricante sólido) y resistencia a condiciones ambientales. En consecuencia, aumenta la vida útil del sustrato y la vida a fatiga [4], [25], [30]–[33].

La electrodeposición es una técnica que se utiliza para aplicar un recubrimiento en un material base, aportando cualidades al material base [16]. La electrodeposición es una técnica simple, sostenible y de bajo costo para el recubrimiento de carbono [3]. Depende de las variables del tiempo de deposición, voltaje y densidad de corriente aplicada. Al manipular tales variables, las propiedades superficiales de un material recubierto con carbono por la técnica de electrodeposición, pueden ser manipuladas para obtener un espesor de la película y el tamaño del grano distinto [4], [20]. Por esta razón, se desea relacionar las variables del proceso de deposición (tiempo, voltaje y corriente) con la vida a fatiga y combinar tales variables para extender la vida a fatiga. Posteriormente conocer si realmente el fenómeno de fragilización por hidrógeno está presente o no en el recubrimiento por la técnica de electrodeposición.

## **2.2 Objetivos**

### **2.2.1 General**

Evaluar la vida útil a fatiga de la aleación de aluminio 6061-T6 recubierto por electrólisis, que permita relacionar de manera integral las variables del proceso de deposición (tiempo, voltaje y corriente) con la vida a fatiga.

### **2.2.2 Específicos**

- Mejorar las propiedades mecánicas del sustrato aplicando recubrimiento de carbono por la técnica de electrodeposición con electrolito sostenible.
- Evaluar la vida a fatiga del aluminio 6061-T6 recubierto sometido a cargas de amplitud constante.
- Determinar la combinación de variables del proceso de electrodeposición que permita extender la vida a fatiga a través de un estudio paramétrico.

## **2.3 Alcances**

- Aplicar un recubrimiento de carbono en aleación de aluminio 6061-T6.
- Aplicar recubrimiento de carbono por la técnica de electrodeposición.
- Determinar un modelo fenomenológico.

## **2.4 Limitaciones**

- Solo se utilizará material base de aleación de aluminio 6061-T6.
- Se realizarán pruebas en ensayos a altos ciclos sólo con cargas pequeñas.

## **2.5 Metas**

Obtener un modelo fenomenológico con base en los parámetros de electrodeposición (tiempo, voltaje y corriente) para extender la vida a fatiga del material base.

### 3. Marco Teórico

En este apartado se pretende exponer la parte teórica en las cuales se sustenta la investigación y el diseño del estudio. La información proporcionada es para el estudio del comportamiento y el efecto del recubrimiento de carbono sobre la vida a fatiga del aluminio 6061-T6, con el propósito de encontrar criterios necesarios para retardar la nucleación de agrietamiento y extender la vida a fatiga.

#### 3.1 Espesor del recubrimiento en función al entorno electrolítico y rugosidad en función del espesor

Existen muchos metales (tanto metales simples como sistemas de aleación) que pueden ser recubiertos por la técnica de electrodeposición. El material que se desea recubrir debe ser eléctricamente conductora y se convierte en cátodo (cargado negativamente) en una celda electroquímica de bajo voltaje, de esta manera, a medida que pasa la corriente se forma un recubrimiento sobre el sustrato base. El espesor del recubrimiento alcanzables varía entre 5 a 250 $\mu\text{m}$ , depende del material base [13].

Mayén *et al.* [3] aplicaron recubrimiento DLC a muestras de aleación de aluminio 6061 por la técnica de electrodeposición, bajo las leyes de electrólisis de Faraday que se determina por la siguiente ecuación:

$$W = \frac{ItM}{zF} \quad (3.1)$$

Donde la ecuación expresa variables de  $I$  que es la corriente involucrada ( $A$ ),  $t$  es el tiempo de deposición ( $s$ ),  $M$  es la masa molar de la sustancia ( $g \text{ mol}^{-1}$ ),  $z$  es el número de electrones implicados en la reacción electroquímica,  $F$  es la constante de Faraday ( $96486 \text{ C mol}^{-1}$ ) y de esta manera obtener la masa de la sustancia producida en el electrodo representada por  $W$  ( $g$ ). El peso del recubrimiento representado en términos de densidad se expresa:

$$W = \rho V \quad (3.2)$$

La ecuación para obtener el volumen:

$$V = xA \quad (3.3)$$

Donde  $\rho$  representa la densidad de recubrimiento,  $V$  es el volumen,  $A_1$  es el área de trabajo del electrodo y  $x$  es el espesor del recubrimiento.

Sustituyendo la ecuación 3.3 en 3.2 y posteriormente sustituir ecuación 3.2 en 3.1 se obtiene:

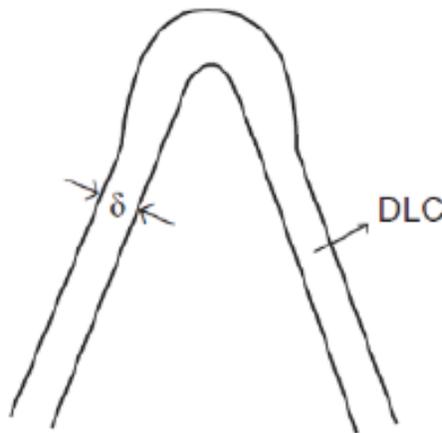
$$\rho xA = \frac{ItM}{zF} \quad (3.4)$$

Considerando que se requiere un grosor  $x$  se obtiene:

$$x = \frac{ItM}{\rho AzF} \quad (3.5)$$

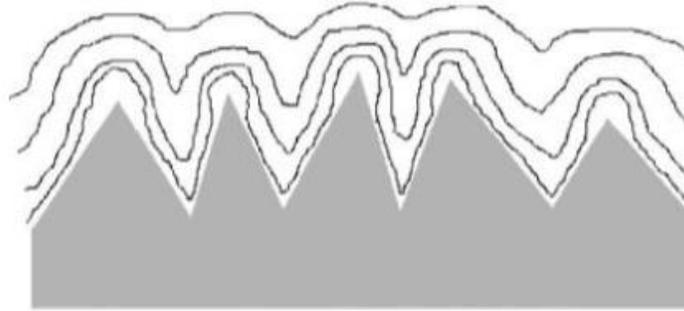
Esta ecuación permite diseñar el espesor requerido en función de los parámetros actuales y temporales durante el proceso de deposición.

Con base en los resultados experimentales obtenidos en la literatura, Salvadori *et al.* [25] argumentaron que los distintos espesores del recubrimiento DLC cambian la rugosidad del sustrato base, es decir, en la deposición de recubrimientos delgados el material se concentra mayormente en la región cóncava de la rugosidad como muestra la Figura 3.1.



**Figura 3.1** Concentración de la deposición DLC en películas delgadas [25].

Esto nos lleva a considerar que entre mayor sea el espesor del recubrimiento de carbono sobre el sustrato, las regiones convexas son llenadas (Figura 3.2). La rugosidad se subestima y la concentración de esfuerzos por rugosidad superficial tiene una probabilidad mínima para los recubrimientos de mayor espesor.



**Figura 3.2** Ilustración de variación de la rugosidad en función del espesor del recubrimiento DLC [25].

### 3.2 Metodología de regresión lineal múltiple

Los modelos de regresión múltiple estudian la relación entre una variable de interés interpretada por  $Y$  (variable dependiente) y de un conjunto de variables independientes interpretadas por  $X_1, X_2, \dots, X_k$ . La función de regresión que relaciona la variable dependiente con las variables independientes es lineal, es decir:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (3.6)$$

Donde la variable  $Y$  es dependiente,  $X_k$  son las variables independientes que alimentan al modelo de regresión, la variable  $\beta_k$  son los coeficientes de regresión que indica el número de unidades que aumentará la variable dependiente y por último la variable  $\varepsilon$  es el término residual del modelo.

Para obtener un modelo de regresión lineal, se utiliza un software estadístico de calidad nombrado NCSS Data Analysis. El software utiliza esta expresión matemática para sintetizar la muestra y obtener un modelo a partir de variables dependientes. Las variables se pueden expresar en forma de matriz:

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_k \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix}, \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix}, \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_k \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Con esta notación compacta, el modelo de regresión lineal múltiple puede ser representado de la siguiente forma:

$$Y = \beta X + \varepsilon \quad (3.8)$$

### 3.3 Relación de incremento en la vida a fatiga

De acuerdo con la investigación de Puchi-Cabrera *et al* [31] utilizaron una ecuación para determinar el porcentaje de incremento en la vida a fatiga de un material recubierto sobre el material base:

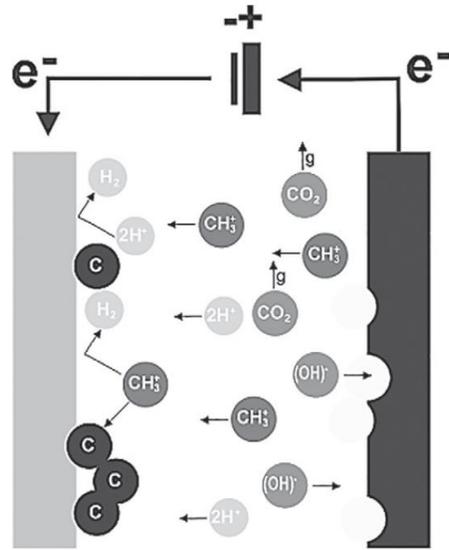
$$\% \text{ incremento en la vida a fatiga } (S) = \frac{N_f^{Coat.}(S) - N_f^{Subst.}(S)}{N_f^{Subst.}(S)} * 100 \quad (3.9)$$

Es la relación del incremento en la vida a fatiga en función del número de ciclos de falla del material con recubrimiento  $N_f^{Coat.}(S)$  y el número de ciclos a falla del material no recubierto  $N_f^{Subst.}(S)$ . De manera que esta relación permite visualizar la mejora en la vida a fatiga en forma de porcentaje.

### 3.4 Electrolito para el control de corriente

De acuerdo con la investigación de Mayén *et al.* [3] y Gallegos *et al.* [24] utilizaron ácido acético obtenido del jugo de caña de azúcar ( $CH_3COOH$ ) como electrolito sostenible para realizar la electrodeposición. Además, se añadió un gramo de bicarbonato de sodio ( $NaHCO_3$ ), de esta manera para aumentar la conductividad y producir tasas de deposición más rápidas a bajos voltajes. En la ecuación 3.10 los grupos metilo se transportan al cátodo hasta que la superficie de aluminio está saturada con una alta concentración de radicales  $CH_3^+$  e iones  $2H^+$  (ver Figura 3.3).





**Figura 3.3** Representación esquemático de la reacción electroquímica general durante la deposición de DLC [3].

### **4. Procedimiento experimental para el recubrimiento de carbono sobre aluminio 6061-T6**

El proceso experimental para el estudio del recubrimiento de carbono sobre aleación de aluminio 6061-T6 se describe a continuación, con el fin de obtener resultados de forma experimental y conocer la naturaleza del fenómeno de fatiga.

#### **4.1 Diseño del Experimento**

Para llevar a cabo el proceso experimental, se requiere poseer un diseño del experimento, el cual, ayudó a poder identificar las necesidades de materia prima y la tecnología requerida, la exploración de información y normas que se requieren para llevar a cabo el proceso experimental y la fabricación de las muestras de acuerdo con la exploración. En este trabajo se dividió en tres etapas diferentes el diseño del experimento para obtener un orden y que la experimentación sea efectiva. La etapa 1 está dirigida hacia la exploración de información y normas establecidas de fuentes confiables en la literatura, la etapa 2 está determinada para la tecnología requerida para el análisis, así como el proceso de manufactura requerida para el estudio y por último la etapa 3 está direccionada hacia la parte científica, que es la obtención de resultados para posteriormente hacer un análisis detallado sobre lo ocurrido en el proceso experimental (ver Figura 4.1):

- A) Estudio sobre los efectos del recubrimiento sobre la vida a fatiga en materiales dúctiles para conocer el comportamiento y la naturaleza del fenómeno de fatiga. Identificación de las variables involucradas en la técnica de electrodeposición y las variables que se obtienen en el recubrimiento. Conocimiento sobre las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio 6061-T6 y, las normas para el diseño geométrico de las muestras y el número de muestras de acuerdo con el estudio.
- B) Equipo que se requiere, diseño paramétrico y manufactura.
- C) Resultados y análisis.

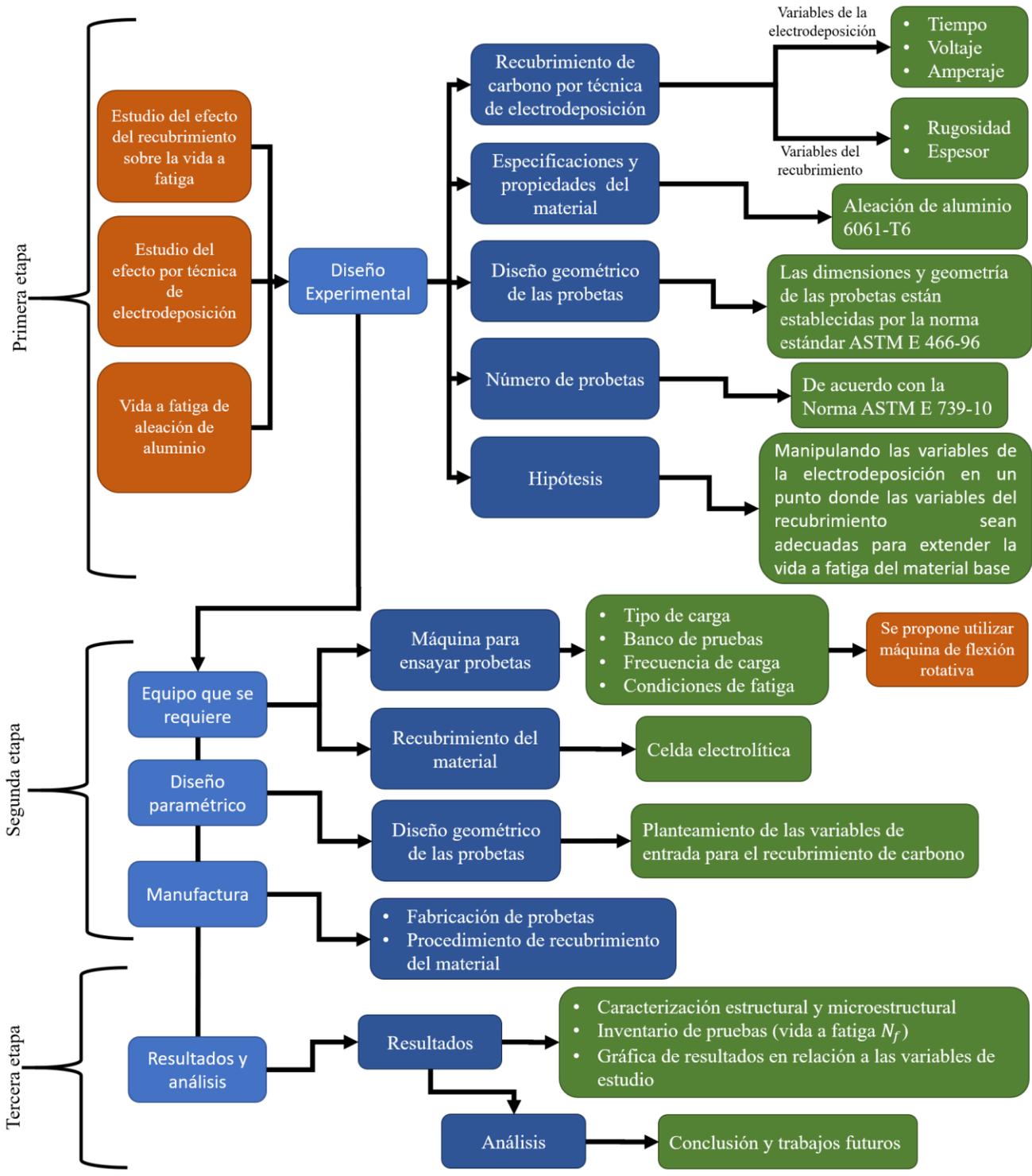
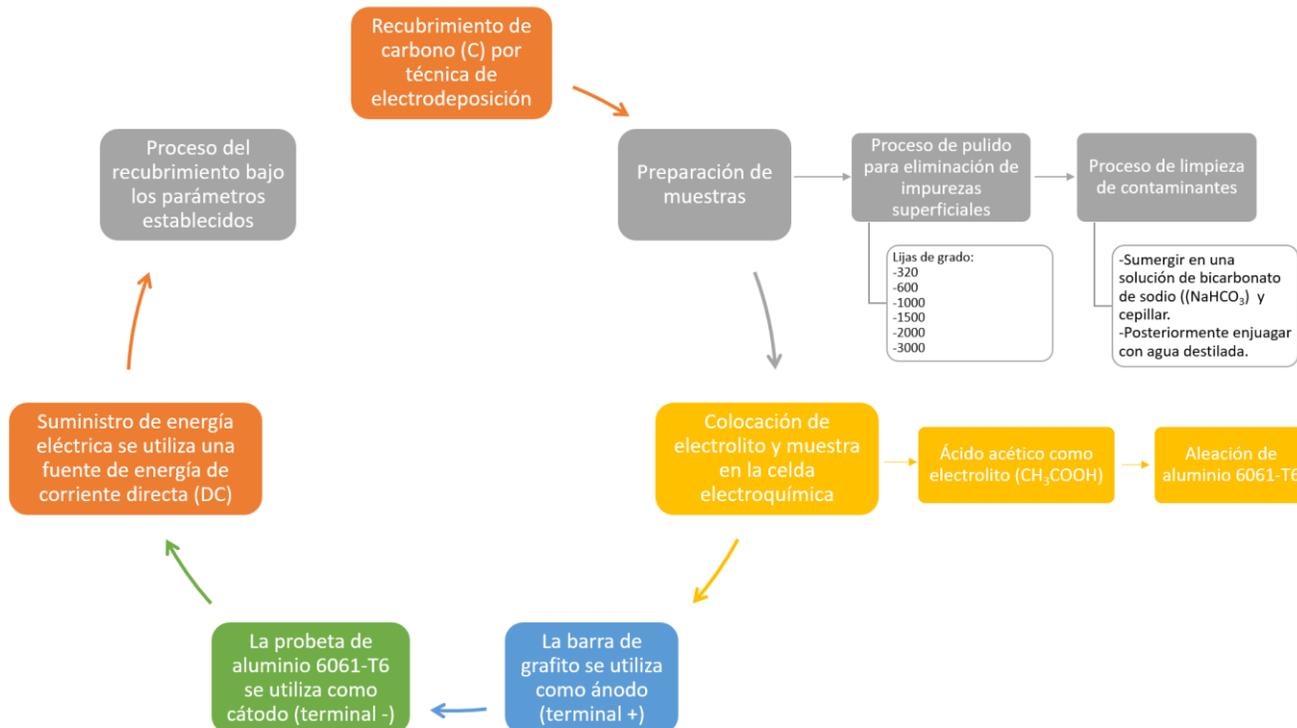


Figura 4.1 Consideraciones del diseño experimental.

#### 4.1.1 Recubrimiento de Carbono por técnica de electrodeposición

En este apartado se plantea el procedimiento y las variables a considerar para el recubrimiento de carbono por la técnica de electrodeposición. Las probetas serán recubiertas con una película de carbono controlando las variables a) tiempo, b) voltaje c) corriente utilizando ácido acético como electrolito. Para la técnica de electrodeposición es necesario una celda electrolítica para poder hacer el proceso del recubrimiento. Durante el proceso se requiere un ánodo y un cátodo: la barra de grafito se utiliza como ánodo y la probeta de aluminio como cátodo. Para el suministro de energía eléctrica se utiliza una fuente de energía de corriente directa (DC). Se preparan las muestras antes de colocarlas en la celda electrolítica, se tienen que pulir con lijas de grado 320, 600, 1000, 1500, 2000 y 3000 (para eliminar la mayoría de las impurezas superficiales que existen en el material). Para posteriormente sumergirlos en una solución de bicarbonato de sodio ( $\text{NaHCO}_3$ ) para cepillarse y limpiar las partículas contaminantes. Al retirar las muestras de la solución se enjuaga con agua destilada para poder colocarlos en la celda electrolítica y posteriormente continuar con el proceso del recubrimiento bajo los parámetros que se controlan, la Figura 4.2 muestra el proceso para el recubrimiento de carbono. Este procedimiento fue utilizada por Mayén, *et al* [3] en su investigación, en el que menciona que el ácido acético en el agua se ioniza y se transporta en el electrolito bajo el efecto de un alto campo eléctrico; los grupos metilo se transportan al cátodo, hasta que la superficie de aluminio se sature con una alta concentración de radicales  $\text{CH}_3^+$  y iones  $2\text{H}^+$ ; Estos son los requisitos principales para la deposición de películas de carbono en la superficie de un material, como se mostró en la Figura 3.3 [21]. Las variables de la electrodeposición son: el tiempo, el voltaje y la corriente. Las variables del recubrimiento son la rugosidad y el espesor.



**Figura 4.2** Proceso de recubrimiento de carbono.

#### 4.1.2 Especificaciones y propiedades del material

Se utilizó aleación de aluminio 6061-T6, es un material endurecido que contiene como principales elementos: aluminio, magnesio y silicio. Es una de las aleaciones de aluminio más comunes en el uso general. En la actualidad tiene muchas aplicaciones, como ejemplo: en la construcción de estructuras de aeronaves, moldes de inyección, refacciones industriales, piezas de automóviles, ingeniería civil, construcción de equipo termodinámico como calderas, motores, rotores, automotriz, maquinaria, herramientas, entre muchas aplicaciones tanto industriales, de hogar e ingeniería [34]. La composición química de la aleación se encuentra en la Tabla 4.1 y las propiedades mecánicas del material se observan en la Tabla 4.2.

**Tabla 4.1** Composición química de la aleación de aluminio 6061-T6 [35].

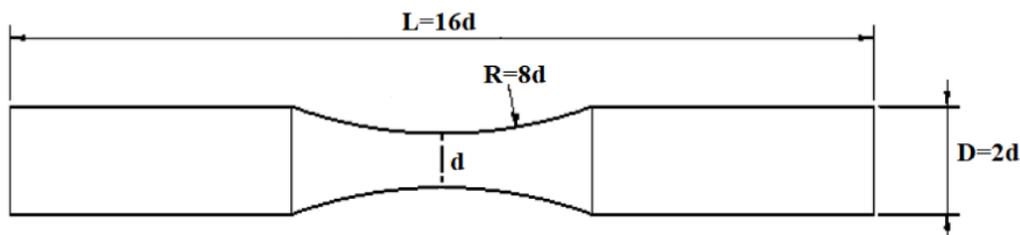
Elemento		Mínimo (%)	Máximo (%)
Aluminio (Al)		95.8	98.6
Silicio (Si)		0.4	0.8
Hierro (Fe)		0	0.7
Cobre (Cu)		0.15	0.4
Manganeso (Mn)		0	0.15
Magnesio (Mg)		0.8	1.2
Cromo (Cr)		0.04	0.35
Zinc (Zn)		0	0.25
Titanio (Ti)		0	0.15
Otros elementos	c/u	0	0.5
	total	0	0.15

**Tabla 4.2** Propiedades mecánicas de la aleación de aluminio 6061-T6 [35].

Resistencia última a la tensión (MPa)	310
Punto de fluencia (MPa)	276
% De elongación	17
Módulo de elasticidad E (MPa)	68.9
Resistencia a la tensión con muesca (MPa)	324
Relación de Poisson ( $\nu$ )	0.33
Resistencia a la fatiga ( $5 \times 10^8$ ciclos) (MPa)	96.5
Módulo cortante (MPa)	26.0
Resistencia al cortante (MPa)	207

### 4.1.3 Diseño geométrico de las probetas

La geometría y dimensiones de las probetas están establecidas por la norma estándar ASTM E466-96 [36]. La norma establece que el tipo de muestra utilizada dependerá del objetivo del programa de prueba, el tipo de equipo, la capacidad del equipo y la forma en que el material está disponible. Se utilizaron probetas con la geometría mostrada en la Figura 4.3. De acuerdo con las relaciones de geometría, los valores de las dimensiones son:  $d=0.25\text{in}$  (6.35mm) en la sección de prueba, por lo tanto, el diámetro de sujeción será de  $D=0.5\text{in}$  (12.7mm), el radio de curvatura  $R=2\text{in}$  (50.8mm) y la longitud de la probeta  $L=4\text{in}$  (101.6mm).



**Figura 4.3** Dimensiones de la probeta en función del diámetro (d) [36].

#### 4.1.4 Número de probetas

El número de muestras están establecidas por la norma estándar ASTM E 739-10 [37]. La norma establece que la cantidad mínima de muestras va a depender del tipo de prueba. De acuerdo con la norma, para poder obtener datos de confiabilidad recomienda que se obtenga de 12 a 24 muestras. Se propone hacer 20 muestras por cada condición para obtener datos confiables.

### 4.2 Equipo que se requiere

Para obtener datos de forma experimental, se requiere de dos cosas importantes: a) máquina para ensayar las probetas y b) proceso de recubrimiento del material. A continuación, se describe el tipo de carga para los ensayos de fatiga, equipo de ensayo de fatiga, frecuencia de carga, la condición de fatiga (N) y técnica de recubrimiento.

#### 4.2.1 Tipo de carga

El tipo de carga para los ensayos de fatiga es de ciclos de esfuerzo totalmente invertidos ( $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = -1$ ) de amplitud constante, como se muestra en la Figura 4.4 [38]. Los ensayos se desarrollaron con un esfuerzo estimado de 150MPa.

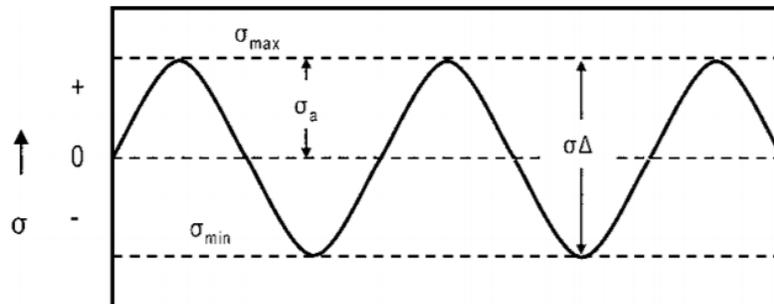
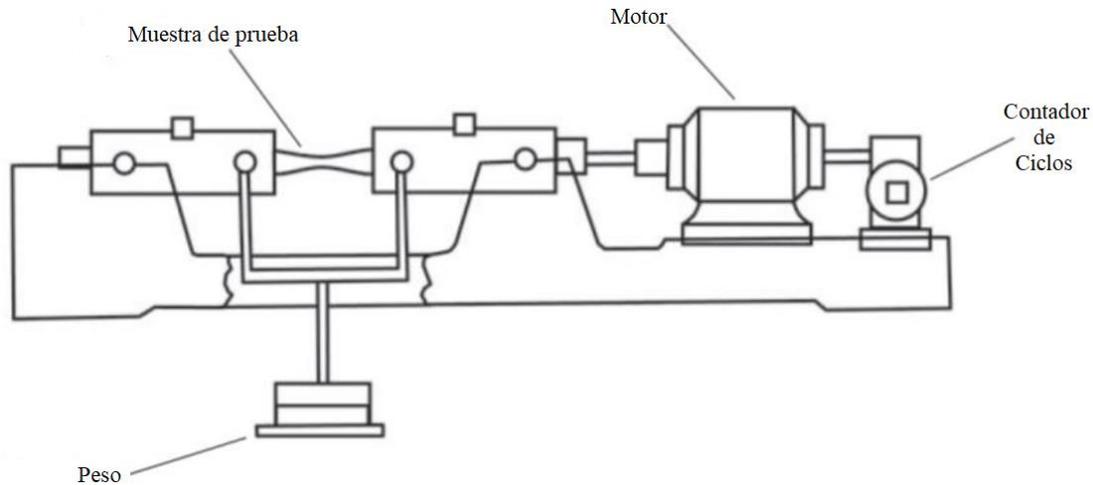


Figura 4.4 Representación de amplitud de carga alternante [38].

#### 4.2.2 Equipo de ensayos de fatiga

Se utilizó una máquina de flexión rotativa tipo Moore. Es una máquina que trabaja con un motor eléctrico rotativo, el cual está conectado al dispositivo de ensayos de flexión rotativa a través de una flecha. La probeta se coloca entre dos husillos, los cuales son impulsados por el motor y en los cuales se conecta un peso fijo colocado verticalmente en el área de ensayo, como se muestra en la Figura 4.5. El peso que se aplica y el motor que hace rotar la probeta,

provocan que la probeta se flexione cíclicamente a la misma frecuencia que gira el motor. Con esta configuración, la probeta se somete a ciclos de fatiga rotativa de amplitud constante hasta la falla.



**Figura 4.5** Esquema de máquina de fatiga por flexión rotativa tipo de Moore [39].

En la Figura 4.6 se muestra un esquema de la distribución de los elementos de apoyo y carga. La máquina está constituida por dos chumaceras de apoyo a los extremos y dos chumaceras tensoras que son las que infringen la carga generando un esfuerzo por flexión sobre la probeta, la distancia de la chumacera de apoyo y la chumacera tensora es de 0.125m. Un motor eléctrico es el encargado de hacer rotar la probeta. El esfuerzo generado en la probeta en la sección media es de 150MPa y para generar este esfuerzo es necesario colocar un peso de 6.1kg. Para el cálculo del esfuerzo se utiliza la siguiente expresión matemática:

$$\sigma_A = \frac{Q/2 \cdot 4d_{AB}}{\pi r^3} \quad (4.9)$$

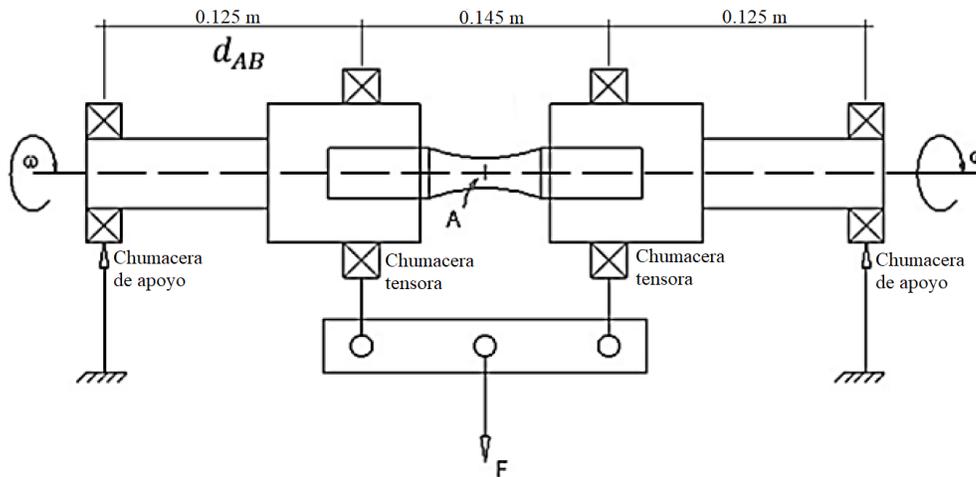
Donde:

$\sigma_A$  - esfuerzo generado en la probeta en la sección media, MPa.

$Q$  - carga, N.

$d_{AB}$  - distancia entre las chumaceras de apoyo y tensora, m.

$r$  - radio de la sección media de la probeta, m.



**Figura 4.6** Esquema de la máquina de flexión rotativa y distribución de los elementos [4].

### 4.2.3 Frecuencia de carga

Vaško *et al.* [40], presentaron pruebas de fatiga de baja y alta frecuencia, en el cual realizaron una comparación de los resultados. Mencionaron que los resultados de carga cíclica de alta frecuencia coinciden con los resultados obtenidos a baja frecuencia, es decir, que la frecuencia de carga no afecta a los ensayos de fatiga. Por lo tanto, la frecuencia de carga para las pruebas de fatiga está dominado por la velocidad nominal de 1740 rpm propia del motor monofásico de ½ HP. Clase B.

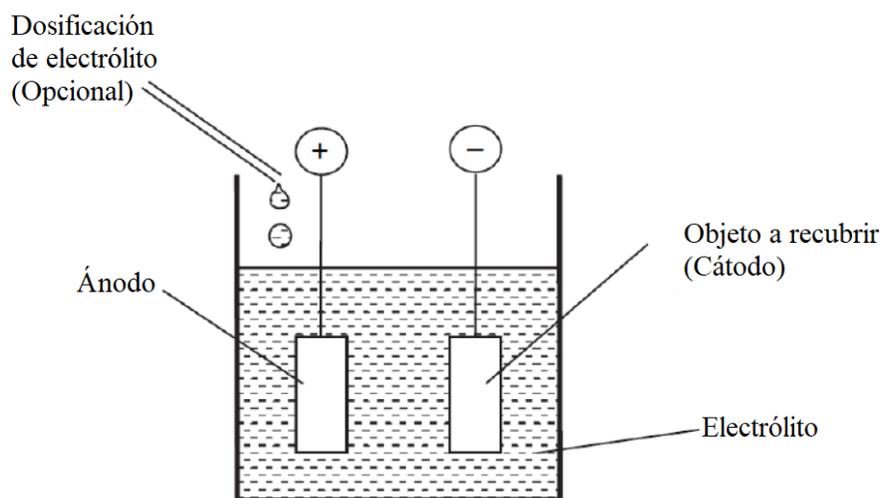
### 4.2.4 Condición de fatiga (N)

La finalidad de este trabajo es extender la vida a fatiga del material con un recubrimiento de carbono manipulando variables de deposición. Para evaluar la vida a fatiga del material, es necesario obtener número de ciclos ( $N_f$ ). Las muestras serán hasta la ruptura, de esta manera obtener resultados y comparar resultados.

### 4.2.5 Recubrimiento del material

En la técnica de electrodeposición, se consideran dos factores principales: el electrolito y las variables del proceso: tiempo, voltaje y corriente. Se utilizó la técnica de electrodeposición para que las muestras sean recubiertas por una película de carbono. La superficie de interés, tiene que ser eléctricamente conductora y se convierte en el cátodo (carga negativa). Por otro lado, el recubrimiento (material a depositar) se convierte en ánodo (carga positiva). En la

Figura 4.7 se muestra un diagrama esquemático de la técnica de electrodeposición. Se propuso utilizar ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) como electrolito y para la deposición del material base (sustrato), debe estar libre de cualquier contaminante. El electrolito es una sustancia que contiene en su composición iones libres y hace que se comporte como un conductor eléctrico [13], [16].



**Figura 4.7** Diagrama esquemático del proceso de electrodeposición, modificado de [13].

### 4.3 Diseño paramétrico

De acuerdo con investigaciones que se encontró en la literatura en el que presentan las variables de deposición para el recubrimiento de carbono (tiempo, voltaje y corriente de entrada) y considerando los resultados obtenidos en la investigación de González [4], se propuso un diseño paramétrico para recubrir carbono a la cantidad de 80 probetas de la aleación de aluminio 6061-T6. Se prepararon 20 muestras por condición de voltaje, las cuales se presentan en la Tabla 4.3 y se prepararon 20 muestras por condición de corriente, las cuales se presentan en la Tabla 4.4.

**Tabla 4.3** Recubrimiento de carbono en función del voltaje y del tiempo.

Condición	Voltaje, V	Tiempo, Horas.
VT15	15	1.63
VT8	8	1.5

**Tabla 4.4** Recubrimiento de carbono en función de la corriente y del tiempo.

Condición	Corriente, A	Tiempo, Horas.
IT2	0.8	2
IT3	0.8	3

#### 4.4 Procedimiento experimental para el recubrimiento de carbono sobre la aleación de aluminio 6061-T6

Las probetas fueron obtenidas a partir de barras de aluminio 6061-T6 de  $\frac{1}{2}$ " (12.7mm). Se cortaron tramos de alrededor de 4.120" (104.648mm) de longitud (Figura 4.8). En seguida se rectificaron los extremos de las piezas para ajustar su longitud a 4" (101.6mm). Finalmente, las piezas se sometieron a un proceso de torneado en un torno CNC DYNAMACH (Figura 4.9) para ajustar a la geometría indicada por la norma ASTM E466-96 [36], en la Figura 4.10 se muestra una fotografía de las probetas obtenidas.



**Figura 4.8** Barras de aluminio 6061-T6 cortadas en tramos.

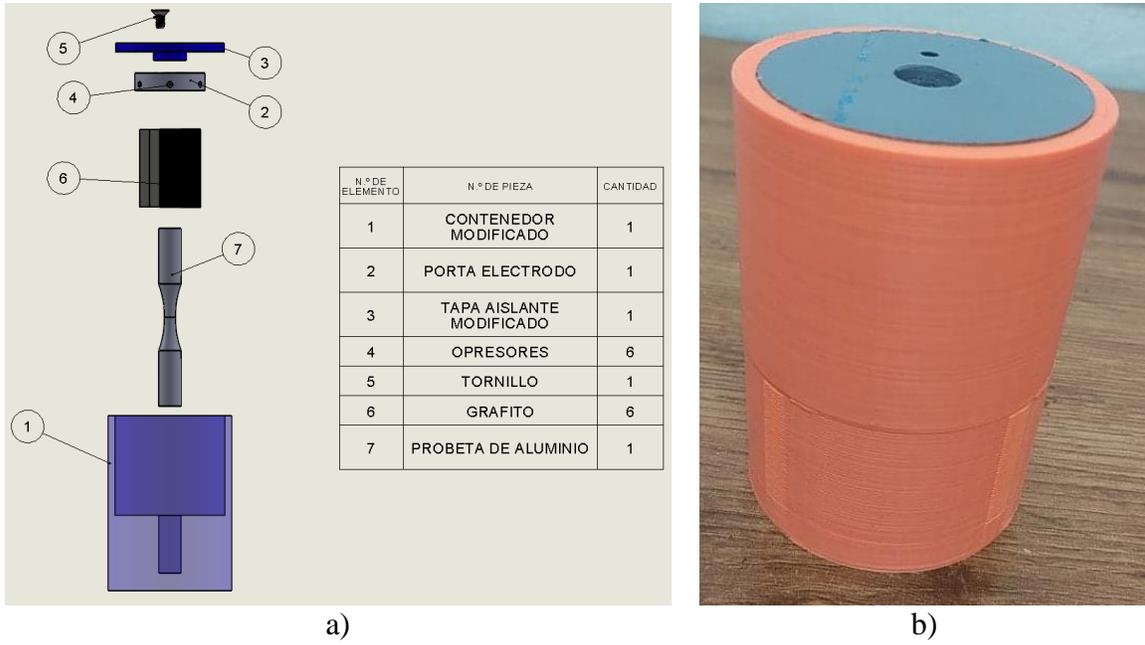


**Figura 4.9** Torno CNC DYNAMACH.



**Figura 4.10** Probetas de aluminio 6061-T6.

Posteriormente, se diseñó una celda electrolítica en un software de diseño CAD 3D como se muestra en la Figura 4.11a, tomando en cuenta las medidas de la probeta y el área a recubrir. Las partes de la celda electrolítica se imprimieron en una impresora 3D en plástico ABS (ver Figura 4.11b).



**Figura 4.11** a) Celda diseñada en software de diseño CAD 3D para aplicar técnica de electrodeposición y b) celda impresa en plástico ABS.

La superficie de las probetas se acondicionó a través de un proceso de pulido progresivo comenzando con lijas de grano 320, 600, 1000, 1200, seguido de 2000 y 2500 hasta la lija de grano 3000. En seguida, las probetas se sumergen en una solución de agua destilada con agregado de bicarbonato de sodio para evitar la formación de óxido sobre la superficie del aluminio. La superficie se cepilla cuidadosamente mientras está sumergida en la solución y posteriormente se enjuagan con agua destilada.



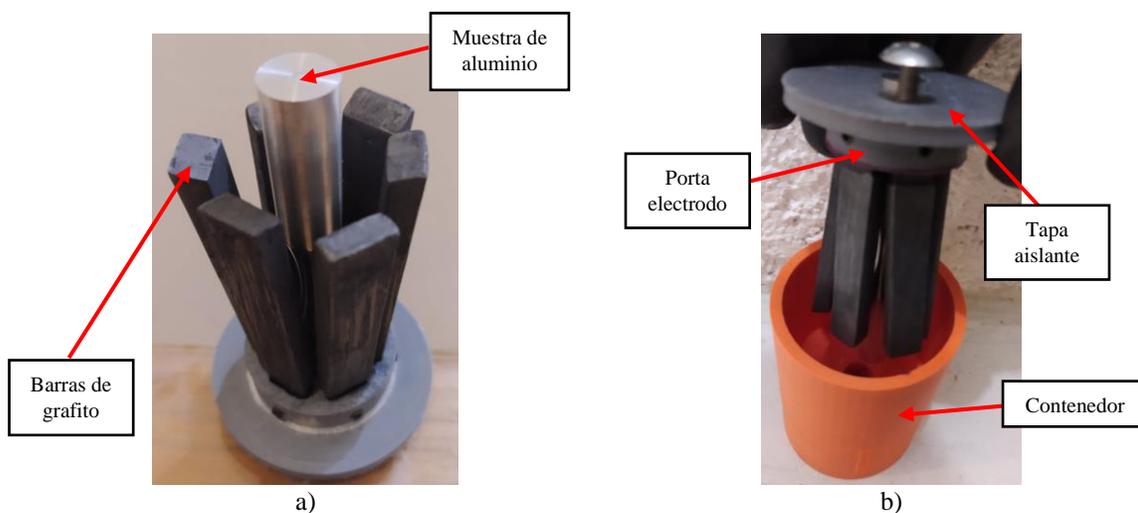
**Figura 4.12** Proceso de pulido progresivo.

Posteriormente las muestras fueron recubiertas con grafito por medio de la técnica de electrodeposición con ácido acético como electrolito con una fracción de volumen del 0.24% (por cada 100 mL de agua destilada, se agregó 1 g de bicarbonato de sodio). Para el proceso de electrodeposición se utilizó grafitos marca *GENERAL'S* modelo 982-2B (ver Figura 4.13).

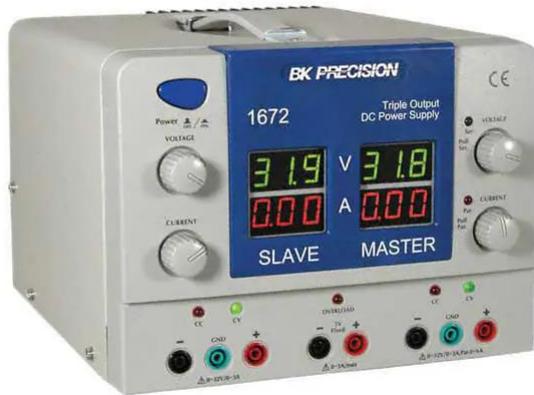


**Figura 4.13** Grafito marca *GENERAL'S* modelo 982-2B.

Se colocaron seis barras de grafito en el porta electrodo, la muestra de aluminio se colocó en la tapa aislante y la separación del grafito con la muestra de aluminio fue de 7 mm, como se muestra en la Figura 4.14a. En la Figura 4.14b se muestra la forma que se tiene que ensamblar la celda electrolítica para proceder a recubrir la muestra. El proceso de deposición se hace en una celda electrolítica (Figura 4.14b), colocando en la carga positiva (ánodo) las barras de grafito y en la carga negativa (cátodo) la muestra de aluminio. Para el suministro de corriente continua se utilizó una fuente de energía B&K PRECISION 1672 (Figura 4.15).

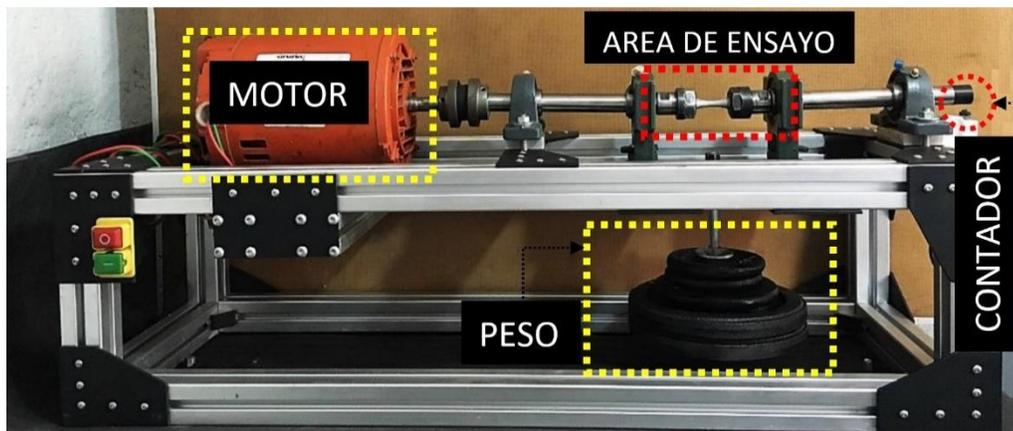


**Figura 4.14** a) Muestra la colocación de barras de grafito y muestra de aluminio, y b) muestra el ensamble de la celda electrolítica.



**Figura 4.15** Fuente de energía B&K PRECISION 1672 corriente continua.

Una vez recubiertas las muestras, posteriormente se ensayaron en una máquina de flexión rotativa (ver Figura 4.16). La máquina cuenta con un sensor infrarrojo modelo TCRT5000 controlado con Arduino Uno (Figura 4.17) para obtener el número de ciclos.



**Figura 4.16** Máquina de fatiga por flexión rotativa.



a)



b)

**Figura 4.17** a) Sensor infrarrojo modelo TCRT5000 y b) placa Arduino Uno.

Las pruebas de fatiga se sometieron a una carga de 59.84 N (6.1 kg), que genera un esfuerzo de 150 MPa sobre la probeta. Los ensayos se realizaron hasta la ruptura del material para obtener la vida útil de las muestras recubiertas (ver Figura 4.18).



Figura 4.18 Probetas ensayadas.

#### 4.4.1 Modificaciones en el procedimiento experimental

Se observó que la temperatura es una variable que influye sobre la vida a fatiga del aluminio desde la manufactura de las probetas. Se compró barras de aluminio 6061-T6 de 3 m de largo con un  $\varnothing=12.7$  mm (1/2 in), de las cuales se cortaron tramos de alrededor de 104.648mm (4.120 in) de longitud con una sierra cinta sin ninguna refrigeración y en seguida se rectificaron los extremos de las piezas para ajustar su longitud a 101.6mm (4 in). Finalmente, las piezas se sometieron a un proceso de torneado en un torno CNC DYNAMACH para ajustar a la geometría indicada por la norma ASTM E466-96 [36]. La velocidad del corte es de 234 RPM aproximadamente al 100% de la velocidad de avance que representa a 47mm/min, como se muestra marcado en recuadro rojo en la Figura 4.19 y en el acabado su velocidad de avance es de 23mm/min. Esto provocó que la vida a fatiga del aluminio disminuyera.

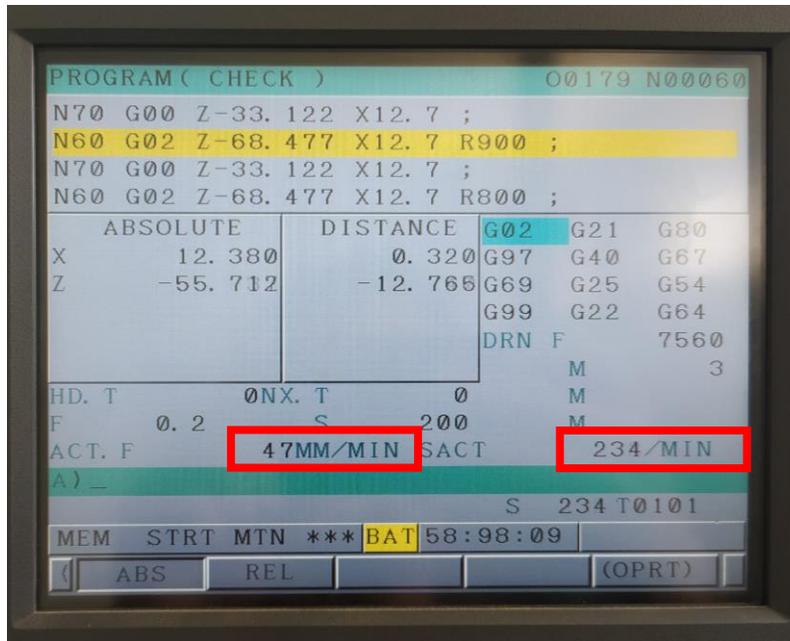


Figura 4.19 Pantalla del torno CNC DYNAMACH para velocidad de avance al 100%.

Petatan, *et al.* [42] recomiendan que para obtener mayor vida a fatiga del aluminio (cuando no se cuenta con taladrina o algún refrigerante para mecanizado), sugieren que la velocidad del corte sea de 234 RPM al 150% de la velocidad de avance que representa a 70mm/min, como se muestra marcado en recuadro rojo en la Figura 4.20, y la velocidad de avance en el acabado es de 35mm/min.

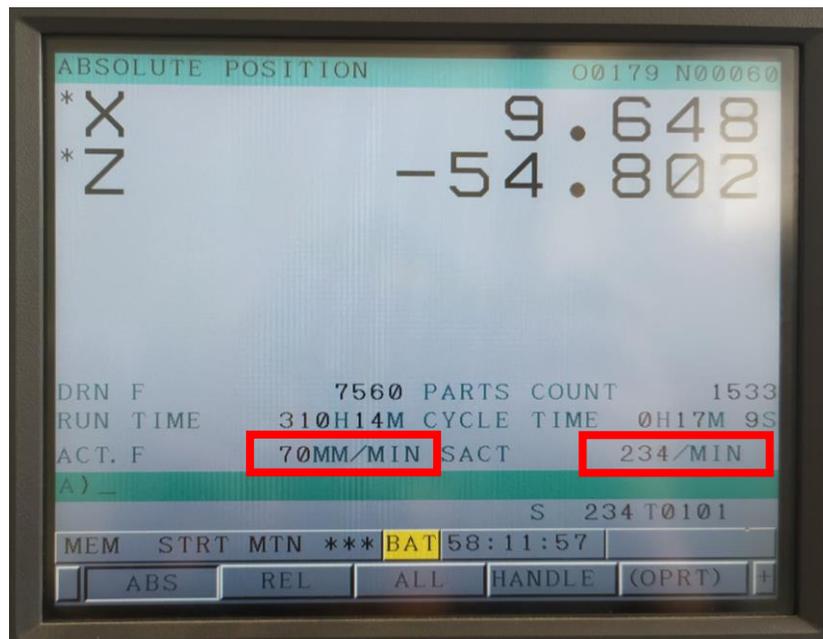


Figura 4.20 Pantalla del torno CNC DYNAMACH para velocidad de avance al 150%.

En el proceso de la electrodeposición, cuando la temperatura no fue controlada, alcanzó una temperatura cercana a los 90°C. Por este motivo, se hizo un sistema hidráulico (ver Figura 4.21) para poder disminuir la temperatura y se logró reducir la temperatura a menos de 35°C.



**Figura 4.21** Sistema hidráulico para el control de temperatura en el proceso de electrodeposición.

## 5. Resultados y discusión

Los ensayos de fatiga se llevaron a cabo en una máquina de flexión rotativa tipo Moore descrita en la Figura 4.16, de acuerdo con el diseño paramétrico descrito en el capítulo 4 (ver Tabla 4.3). Se realizaron 100 ensayos de fatiga hasta la fractura, de las cuales se obtuvo el ciclaje para cada condición. Éstos se pueden observar a partir de la Tabla 6.1 a la Tabla 6.5.

**Tabla 5.1** Resultados de número de ciclos para la condición de referencia, sin recubrimiento (SR).

Función de Tiempo y Corriente		
Condición	Muestra	Número de ciclos
SR	SR-1	218750
	SR-2	220321
	SR-3	137979
	SR-4	278476
	SR-5	44516
	SR-6	348486
	SR-7	176750
	SR-8	246449
	SR-9	371578
	SR-10	171950
	SR-11	281443
	SR-12	143143
	SR-13	148373
	SR-14	377502
	SR-15	298765
	SR-16	300965
	SR-17	219665
	SR-18	320559
	SR-19	385669
	SR-20	236591

**Tabla 5.2** Número de ciclos para la condición VT15.

a) Función de Voltaje y Tiempo		
Condición	Muestra	Número de ciclos
VT15	VT15-1	17748
	VT15-2	30778
	VT15-3	68389
	VT15-4	104661
	VT15-5	37967
	VT15-6	146089
	VT15-7	65339
	VT15-8	280886
	VT15-9	33466
	VT15-10	78706
	VT15-11	167711
	VT15-12	250765
	VT15-13	4243
	VT15-14	148556
	VT15-15	182693
	VT15-16	85315
	VT15-17	103556
	VT15-18	98516
	VT15-19	84743
	VT15-20	64514

**Tabla 5.3** Número de ciclos para la condición VT8.

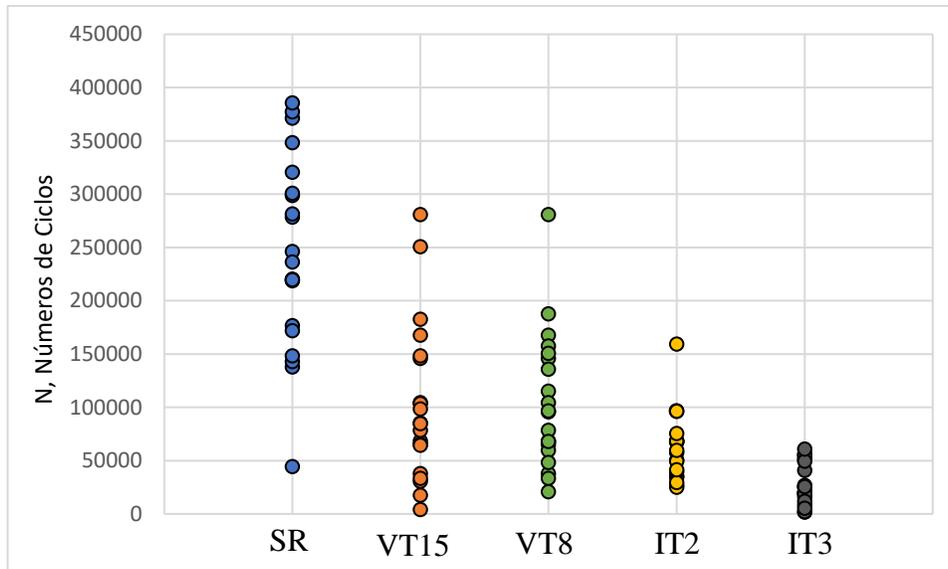
b) Función de Voltaje y Tiempo		
Condición	Muestra	Número de ciclos
VT8	VT8-1	115449
	VT8-2	95948
	VT8-3	68389
	VT8-4	104661
	VT8-5	37967
	VT8-6	146089
	VT8-7	65339
	VT8-8	167711
	VT8-9	280886
	VT8-10	33466
	VT8-11	59703
	VT8-12	78706
	VT8-13	157668
	VT8-14	96672
	VT8-15	150866
	VT8-16	135966
	VT8-17	20864
	VT8-18	187925
	VT8-19	48575
	VT8-20	68152

**Tabla 5.4** Número de ciclos para la condición IT2.

c) Función de Tiempo y Corriente		
Condición	Muestra	Número de ciclos
IT2	IT2-1	27035
	IT2-2	25217
	IT2-3	96586
	IT2-4	34720
	IT2-5	57750
	IT2-6	67543
	IT2-7	68493
	IT2-8	159535
	IT2-9	68152
	IT2-10	35569
	IT2-11	96789
	IT2-12	50395
	IT2-13	39655
	IT2-14	29678
	IT2-15	49685
	IT2-16	68456
	IT2-17	75649
	IT2-18	59673
	IT2-19	41678
	IT2-20	96584

**Tabla 5.5** Número de ciclos para la condición IT3.

d) Función de Tiempo y Corriente		
Condición	Muestra	Número de ciclos
IT3	IT3-1	1849
	IT3-2	55962
	IT3-3	16154
	IT3-4	8333
	IT3-5	19857
	IT3-6	27035
	IT3-7	25217
	IT3-8	19652
	IT3-9	40960
	IT3-10	52933
	IT3-11	20050
	IT3-12	18994
	IT3-13	2079
	IT3-14	11963
	IT3-15	50887
	IT3-16	55579
	IT3-17	5561
	IT3-18	25821
	IT3-19	49771
	IT3-20	61002



**Figura 5.1** Gráfica de número de ciclos para cada condición.

La Figura 5.1 representa de forma gráfica los datos obtenidos de cada condición y de acuerdo con la escala de valores, se observa claramente que las muestras de referencia en general tienen mayor número de ciclos que las muestras recubiertas, independientemente de la condición. De igual manera, en la gráfica se puede observar que, cuando el tiempo del recubrimiento es mayor, el número de ciclos disminuye. Subrayando que estas muestras no pasaron por el proceso de pulido. El tiempo es la variable de la electrodeposición que influye en gran medida en la vida a fatiga del material, entre mayor sea el tiempo de deposición, menor será la vida a fatiga del material. Sin embargo, entre mayor sea el tiempo de deposición, mayor es el espesor del recubrimiento. Pero se puede observar que el espesor no influye en la vida a fatiga del material para aleaciones de aluminio. Por tal motivo, se hizo una serie de pruebas extras para conocer el comportamiento del aluminio recubierto con diferentes parámetros.

Se analizaron diferentes tipos de condiciones para conocer el comportamiento del aluminio recubierto y sin recubrimiento. Para poder observar de una manera más amplia los resultados que se obtuvieron, se representó por colores para identificar las muestras que tuvieron un mayor desempeño y cuáles muestras tuvieron un bajo desempeño durante la prueba de fatiga. La Tabla 5.6 muestra la clasificación de colores.

**Tabla 5.6** Clasificación de colores del desempeño obtenido.

	Bajo
	Medio
	Alto
	Sobresaliente

Para la condición REV (muestras sin recubrimiento y lijadas en seco), el número de ciclos se muestran en la Tabla 5.7. Las muestras fueron sometidas a un proceso de pulido con lijas de grado 320, 600, 1000, 1500, 2000 y 3000.

**Tabla 5.7** Número de ciclos para las muestras sin recubrimiento (muestras lijadas en seco).

<b>Muestra</b>	<b>Número de ciclos</b>
REV1	53698
REV2	82065
REV3	66320
REV4	46254
REV5	31990
REV6	78938
REV7	48517

Condición NSR (muestras sin recubrimiento), el número de ciclos se muestran en la Tabla 5.8. Estas muestras no pasaron por el proceso de pulido con el fin de observar el efecto que tiene el proceso de manufactura sobre la vida a fatiga del material.

**Tabla 5.8** Número de ciclos para las muestras sin recubrimiento sin pulir.

<b>Muestra</b>	<b>Número de ciclos</b>
NSR-1	218750
NSR-2	220321
NSR-3	137979
NSR-4	278476
NSR-5	348486
NSR-6	176750
NSR-7	246449
NSR-8	371578
NSR-9	171950
NSR-10	281443
NSR-11	143143
NSR-12	148373

El número de ciclos para las muestras recubiertas con la condición VT, se muestran en la Tabla 5.9. Estas muestras fueron recubiertas por la técnica de electrodeposición controlando el voltaje a 15 V durante un tiempo de una hora y 37 minutos. En la columna de proceso, se describe si la muestra pasó por el proceso de pulido en seco o en agua. En la tabla se puede observar claramente que las muestras que no pasaron por el proceso de pulido, son las que tuvieron mayor número de ciclos y las muestras pulidas tuvieron una reducción significativa sobre la vida a fatiga.

**Tabla 5.9** Número de ciclos para las muestras con la condición VT.

Muestra	Número de ciclos	¿Las muestras se lijaron?	Proceso
VT-1	17748	Si	Lijado en seco
VT-2	30778	Si	Lijado en seco
VT-3	68389	Si	Lijado en seco
VT-4	104661	Si	Lijado en seco
VT-5	37967	Si	Lijado en seco
VT-6	146089	No	
VT-7	65339	Si	Lijado en seco
VT-8	280886	No	
VT-9	33466	Si	Lijado en agua
VT-10	78706	No	
VT-11	167711	No	
VT-12	32015	Si	Lijado en seco

El número de ciclos para las muestras recubiertas con la condición NIT2, se muestran en la Tabla 5.10. Estas muestras fueron recubiertas por la técnica de electrodeposición controlando el amperaje a 0.8A durante un tiempo de dos horas. Todas las muestras pasaron por el proceso de pulido en seco, observando claramente que se obtuvo un bajo desempeño en la vida a fatiga.

**Tabla 5.10** Número de ciclos para las muestras con la condición NIT2.

Muestra	Número de ciclos
NIT2-1	27035
NIT2-2	25217
NIT2-3	96586
NIT2-4	34720
NIT2-5	57750

Posteriormente, se intentó replicar los datos reportados por González [4] para la condición de 15 V durante una hora (es la condición que presentó mayor número de ciclos). Sin embargo, los datos obtenidos no fueron los esperados (ver Tabla 5.11).

**Tabla 5.11** Número de ciclos obtenidos vs número de ciclos de González [4].

Muestra	Número de ciclos obtenidos	Números de ciclos de González [4].
T2-A	32565	225429
T2-B	109381	243938
T2-C	94446	334819
T2-D	32565	151681
T2-E	61250	181780
T2-F	71750	200540

Por último, se hizo un pequeño estudio paramétrico para observar el efecto del recubrimiento sobre la vida a fatiga del material base, controlando el tiempo en un rango de 20 a 60 minutos (estas muestras no pasaron por el proceso de pulido). En la Tabla 5.12 a la Tabla 5.14 se muestra el número de ciclos obtenidos.

**Tabla 5.12** Número de ciclos obtenidos en un tiempo de 20 minutos a 15V [4].

Condición	Muestra	Voltaje	Tiempo	Ciclos
VT15V	1	15V	20 min	137386
	2			129582
	3			317385
	4			276721
	5			164849
	6			253566

**Tabla 5.13** Número de ciclos obtenidos en un tiempo de 30 minutos a 15V.

Condición	Muestra	Voltaje	Tiempo	Ciclos
VT15M	1	15V	30 min	127765
	2			152386
	3			169753
	4			339790
	5			266000
	6			141758

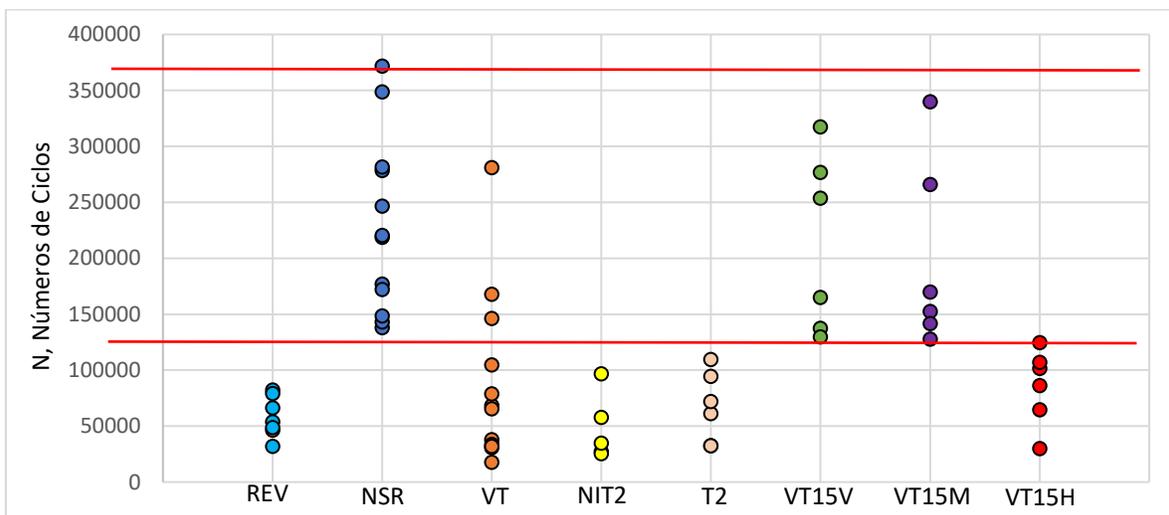
**Tabla 5.14** Número de ciclos obtenidos en un tiempo de una hora a 15V.

Condición	Muestra	Voltaje	Tiempo	Ciclos
VT15H	1	15V	60 min	29827
	2			124482
	3			101435
	4			64442
	5			86234
	6			106901

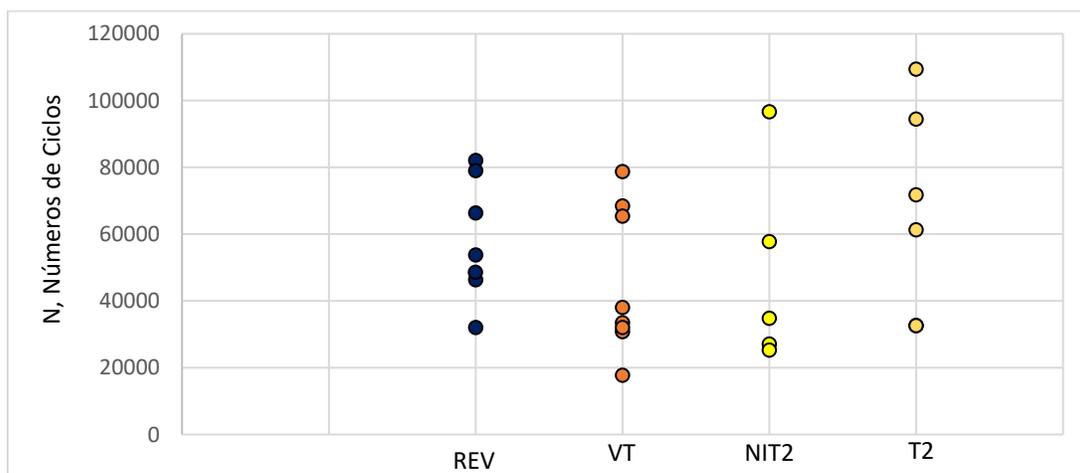
En la Figura 5.2 se muestra una gráfica, en la cual, se puede observar la diferencia entre todos los resultados. Se observa un mejor comportamiento sobre la vida a fatiga para la condición NSR, la cual representa las muestras sin recubrimiento, sin pulir y mecanizadas a una velocidad de avance al 150%. La condición REV (son las muestras sin recubrimiento, pero con proceso de pulido) fue la que presentó una reducción significativa sobre la vida a fatiga. Para las condiciones VT, NIT2, T2 y VT15H, de igual manera, fueron las que presentaron una reducción sobre la vida a fatiga. Para las condiciones VT15V y VT15M, no se obtuvo ninguna diferencia en la vida a fatiga respecto a los datos de referencia del material sin recubrimiento (NSR). Se logró observar que el tiempo límite para el recubrimiento es de 45 min, se cree que después de este tiempo el amperaje comienza a degradar en el interior del material y por esta razón disminuye la vida a fatiga del material. La Tabla 5.15 muestra el porcentaje de reducción de la vida a fatiga, la condición de referencia fueron las muestras sin recubrimiento (NSR). Sin embargo, en la Figura 5.3 se puede observar una gráfica de los datos obtenidos de las muestras que pasaron por el proceso de pulido, en la cual, se puede observar que el número de ciclos a fatiga de las muestras recubiertas son realmente muy dispersos. Esto puede deberse a diferentes situaciones: 1) el proceso de pulido no fue uniforme, 2) el proceso de pulido fue a mano, por ende, no fue igual para todas las muestras, 3) el tiempo de pulido, 4) la manufactura, 5) el pH del electrolito, 6) factores externos como las condiciones ambientales, incluso se puede incluir que es la naturaleza del fenómeno de la fatiga (estas situaciones aplican para todas las muestras).

**Tabla 5.15** Porcentaje de reducción de la vida a fatiga (NSR es la condición de referencia).

Condición	Porcentaje
NSR	0%
REV	-72.84%
VT	-58.67%
NIT2	-77.5%
T2	-31.24%
VT15V	-0.57%
VT15M	-6.95%
VT15H	-60.11%



**Figura 5.2** Número de ciclos a fatiga de todas las muestras.



**Figura 5.3** Número de ciclos a fatiga de muestras lijadas.

Uno de los fenómenos que influyen de gran medida en la reducción de la vida a fatiga del material es cuando las muestras son sometidas a un proceso de pulido progresivo. En la Figura 5.4 se muestra una gráfica comparativa de las muestras que pasaron por el proceso de lijado y no lijado, en muestras sin recubrimiento y recubiertas a 15V en un tiempo de una hora con 37 minutos. Condición SR y VT15, no pasaron por el proceso de pulido y, condición REV y VT, pasaron por el proceso de pulido. Las muestras lijadas presentaron un desempeño muy bajo, y esta reducción se debe porque las muestras al momento de ser lijadas, se aplicaba una pequeña carga sobre la muestra que esto provocaba una pequeña flexión (incluso recordando que el nivel de esfuerzo para las pruebas de fatiga fue baja, de 150 MPa).

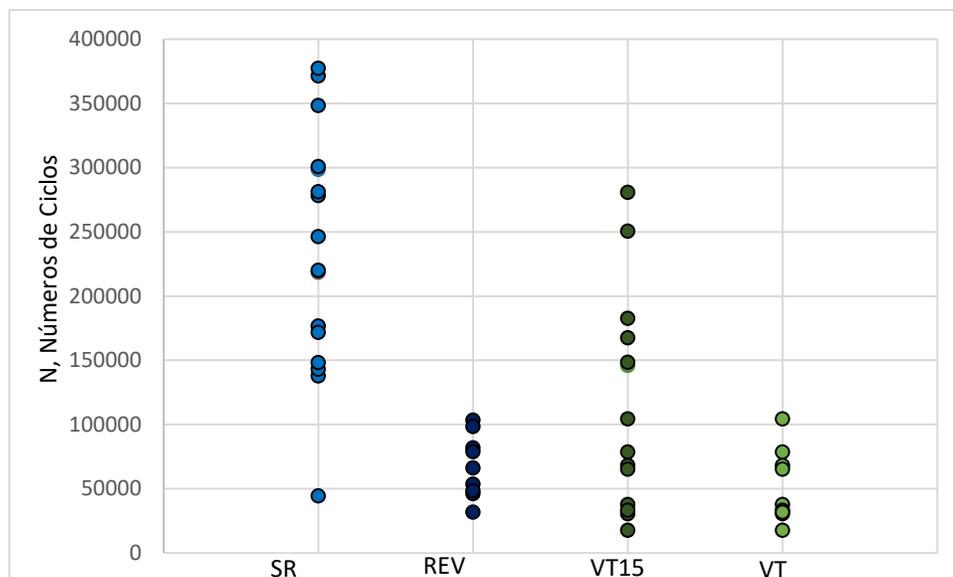
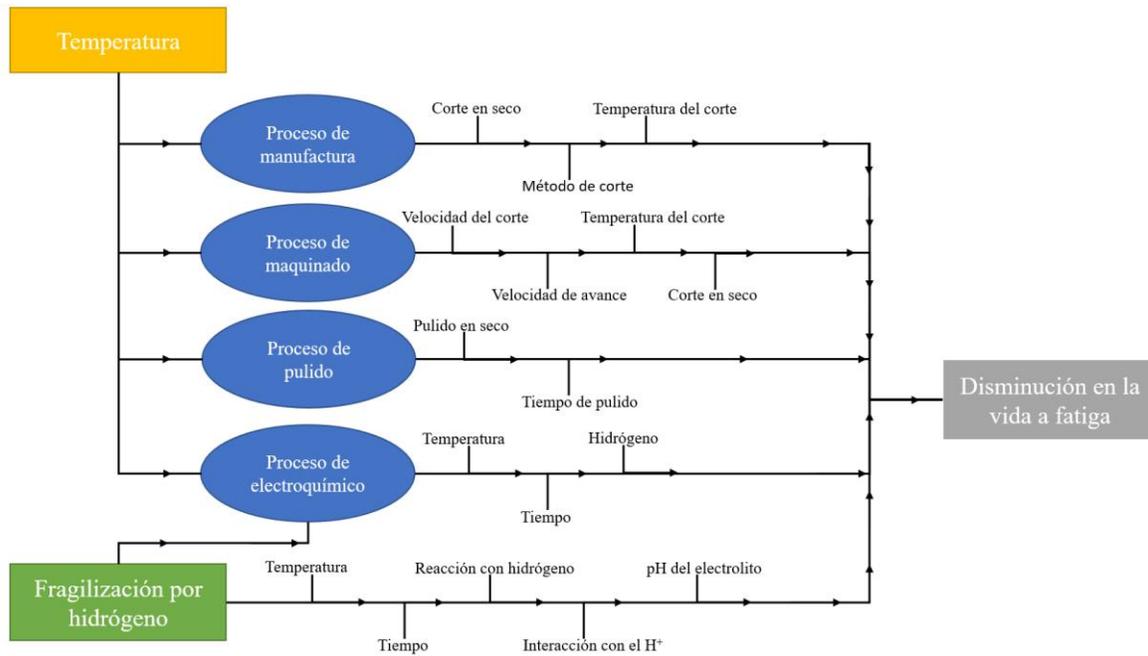


Figura 5.4 Efecto del lijado en la vida útil a fatiga.

## 5.1 Fenómenos que influyen en la vida a fatiga del aluminio

En el proceso experimental, se presentaron una serie de manifestaciones y a continuación, se describen los diferentes fenómenos que se lograron identificar durante todo el proceso experimental. En la Figura 5.5 se muestra un mapa, el cual, describe de una manera general los fenómenos que influyen en la vida a fatiga del aluminio. La Figura 5.6 muestra las variables que influyen sobre la vida a fatiga.



**Figura 5.5** Mapa conceptual de los fenómenos que influyen en la vida a fatiga del aluminio.

### 5.1.1 Temperatura en el proceso de manufactura de las muestras

Por lo general, el aluminio es vendido en tramos largos de aproximadamente 10 ft (3 m aproximadamente) de longitud y para obtener las muestras se requiere cortar. Se cortaron en tramos de alrededor de 4.120 in (104.648 mm) con una sierra de cinta sin lubricación ni refrigeración. Por ende, las muestras fueron afectadas de gran manera por la temperatura provocada por el corte. Por otro lado, después de observar este fenómeno, se procede a cortar las muestras con una herramienta llamada arco con segueta. El resultado fue favorable, la temperatura tuvo un impacto menor sobre la vida a fatiga del material. Sin embargo, no fue lubricada ni refrigerada, esto quiere decir que de igual manera la muestra fue afectada por la temperatura, pero el efecto fue menor.

### 5.1.2 Temperatura en el proceso de maquinado

Para la fabricación de las muestras, se sometieron a un proceso de torneado en un torno CNC DYNAMACH. Para este proceso se debe considerar diferentes condiciones: a) velocidad del giro, b) velocidad del avance, c) lubricación y d) enfriamiento. Para la lubricación y enfriamiento, en maquinado, se utiliza un líquido llamado taladrina (conocido como aceite de corte), es un producto compuesto por agua y aceite. Se emplea en la industria de mecanizado mecánico como lubricante y refrigerante. Sin embargo, a falta de la taladrina, el

torneado se realizó sin lubricación ni refrigeración. Por consecuencia, la temperatura tiene un impacto significativo en la fabricación de las muestras.

### **5.1.3 Temperatura en el proceso de pulido**

Para el proceso de pulido, se utilizaron lijas de grado 320, 600, 1000, 1500, 2000 y 3000, para eliminar la mayor parte de las impurezas superficiales que existen en el material. Se hizo de diferentes maneras: en seco y con abundante agua. El proceso de pulido en seco fue el que generó mayor calentamiento del material, debido al aumento de temperatura por el contacto de la hoja y el material. Se utilizó agua para mantener la temperatura constante durante el proceso de pulido, para evitar efectos indeseables por calentamiento de la muestra.

### **5.1.4 Temperatura en el proceso de electrodeposición**

Para un diseño de un sistema de electrodeposición, se deben considerar algunas características como: los materiales de la celda electrolítica, tipo de ventilación y la temperatura ambiental. De acuerdo con la investigación de Nava [41], la temperatura en la celda electrolítica, hace crecer la conductividad del electrolito, la velocidad de difusión, la disolución química del ánodo y la redisolución del cátodo. El efecto total de un descenso de la polarización. El desprendimiento de hidrógeno y la precipitación de óxidos disminuye al reducirse la polarización, esto provoca también disminución en la influencia sobre el depósito. Y el aumento de temperatura, incrementa el desprendimiento de hidrógeno y la precipitación de sales contaminadoras [16], [41].

### **5.1.5 Fragilización por hidrógeno**

El estudio del fenómeno de fragilización por hidrógeno, hasta la actualidad, es difícil de comprender y la detención de la fragilización por hidrógeno, es un fenómeno complicado de controlar. Por lo general, los materiales más afectados por tal fenómeno son las aleaciones de aluminio, aleaciones de titanio y los aceros de alta resistencia, sin embargo, no afecta por igual a todos los materiales metálicos [26].

El hidrógeno es absorbido por el metal de forma atómica, el  $H^+$  tiene una interacción con la superficie del material. Estas moléculas, por su diminuto tamaño, pueden penetrar la estructura cristalina del metal provocando el daño por fragilización. El daño por hidrógeno

afecta de gran manera en las propiedades mecánicas de los materiales, como la pérdida de ductilidad, resistencia a la fatiga, entre otros [26].

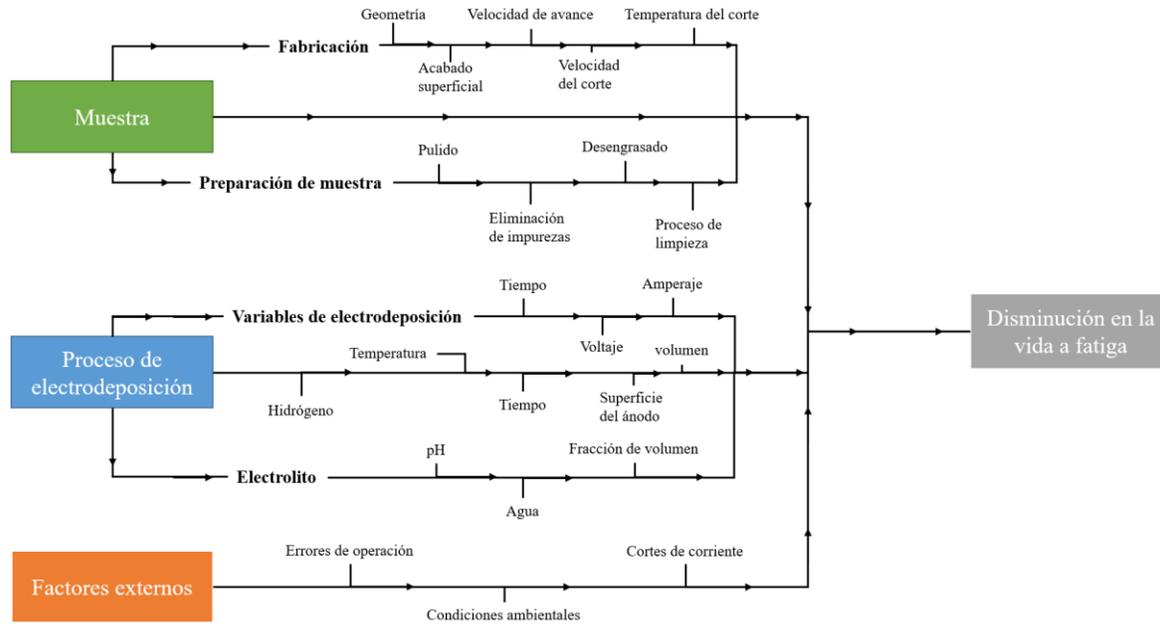
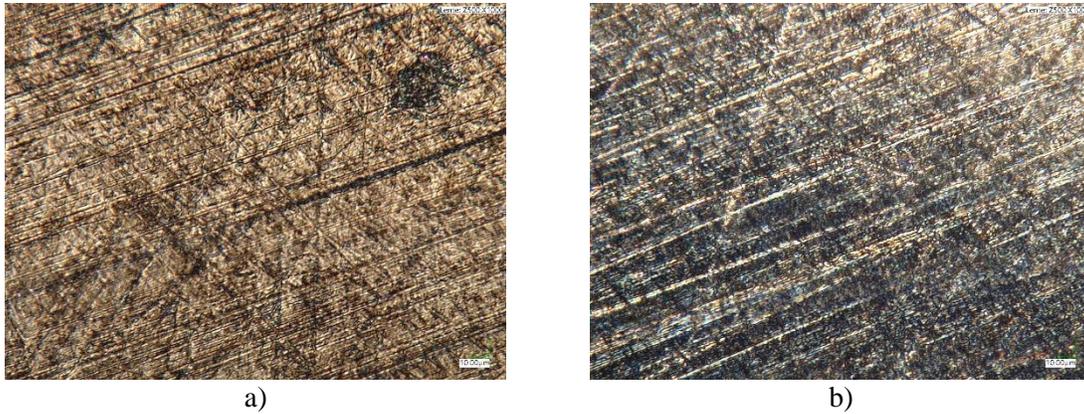


Figura 5.6 Diagrama conceptual de las variables que influyen sobre la vida a fatiga.

## 5.2 Caracterización de muestras

### 5.2.1 Rugosidad de las muestras de aluminio 6061-T6

El recubrimiento se caracterizó a través de micrografías en 2D y 3D en 10 muestras de aluminio 6061-T6 sin recubrimiento en tres zonas distintas por cada muestra mediante un microscopio óptico Keyence 970F (ver Anexo A). La superficie de las probetas se acondicionó a través de un proceso de pulido progresivo comenzando con lijas de grano 320, 600, 1000, 1200, seguido de 2000 y 2500 hasta la lija de grano 3000. En la Figura 5.7a se muestra la micrografía en 2D de la muestra sin recubrimiento REV1 en una zona (a) en la cual se obtuvo un tamaño de rugosidad máxima de  $6.05\mu\text{m}$  y en la Figura 5.7b se muestra la micrografía en 2D de la muestra REV1 en una zona (b) en la cual se obtuvo un tamaño de rugosidad máxima de  $5.68\mu\text{m}$ .



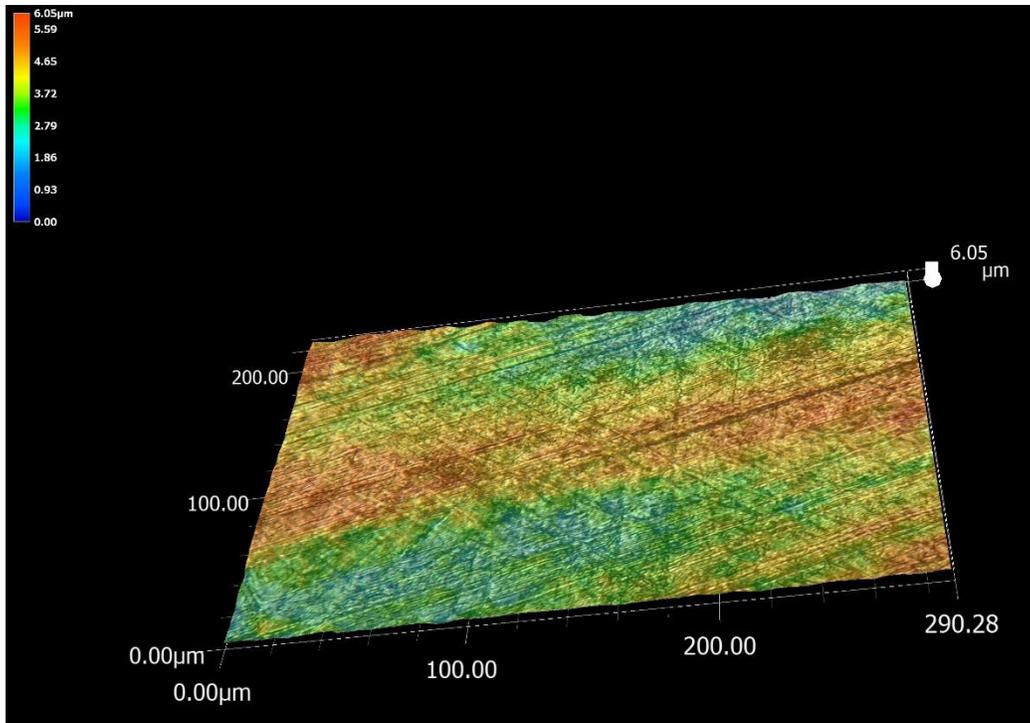
**Figura 5.7** Micrografía 2D del aluminio 6061-T6 a) muestra SR-1 zona a y b) muestra SR-1 zona b.

Se elaboró una tabla de rugosidades de todas las muestras (ver en anexo A), por cada muestra se midió en tres zonas distintas y se obtuvo un valor promedio de rugosidad la cual se puede observar en la Tabla 5.16 con el objetivo de tener un control de la rugosidad superficial de las muestras.

**Tabla 5.16** Rugosidad promedio por cada muestra de aluminio 6061-T6 sin recubrimiento.

Muestra	Promedio $R_a$ ( $\mu m$ )
REV1	5.64
REV2	4.95
REV3	4.88
REV4	5.35
REV5	5.50
REV6	5.68
REV7	4.7
REV8	5.29
REV9	4.97
REV10	5.09

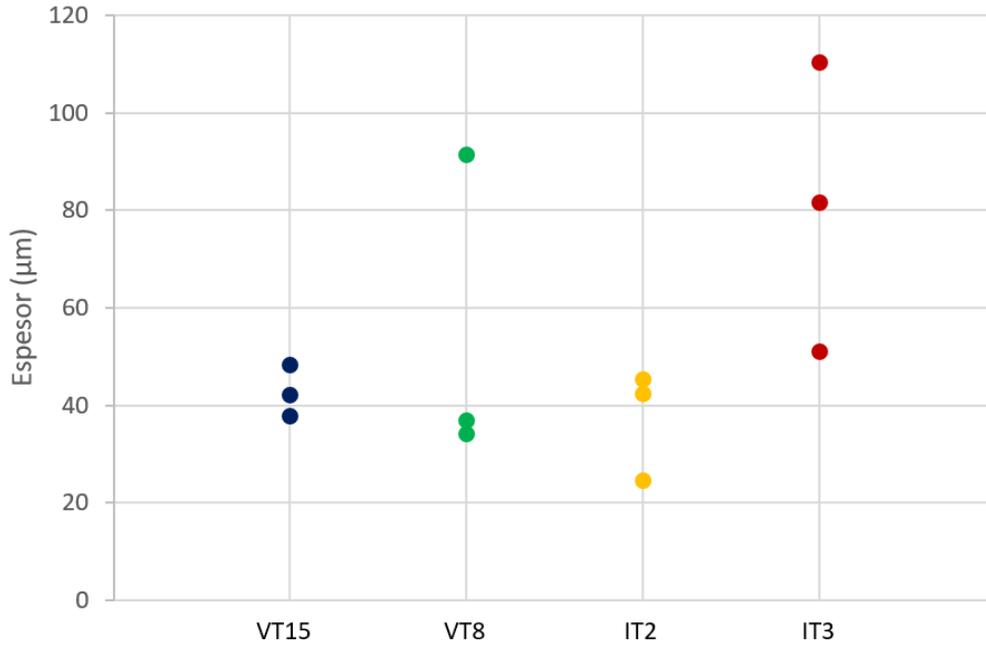
En la Figura 5.8 se muestra una micrografía con paleta de colores en 3D de la muestra REV1 analizada en la zona (a), el color azul representa el punto de referencia cero de la rugosidad y el color rojo representa la zona con mayor rugosidad.



**Figura 5.8** Micrografía 3D de la rugosidad del aluminio 6061-T6 de la muestra REV1.

### 5.2.2 Espesor del recubrimiento

Se midió el espesor del recubrimiento en tres zonas distintas (zona a, zona b y zona c) por condición en un microscopio óptico 3D para relacionar el espesor con la vida a fatiga del material. El espesor varió entre  $24\mu m - 110\mu m$  (ver micrografías y tabla en Anexo A) y en la Figura 5.9 se muestra una gráfica comparativa, para la condición VT8 un dato no proporciona dato confiable, debido a que en la micrografía se muestra una capa de residuos. En la Tabla 5.17 se muestra un promedio del espesor de cada condición.



**Figura 5.9** Gráfica comparativa de espesores de cada condición.

**Tabla 5.17** Espesor del recubrimiento en tres zonas por condición.

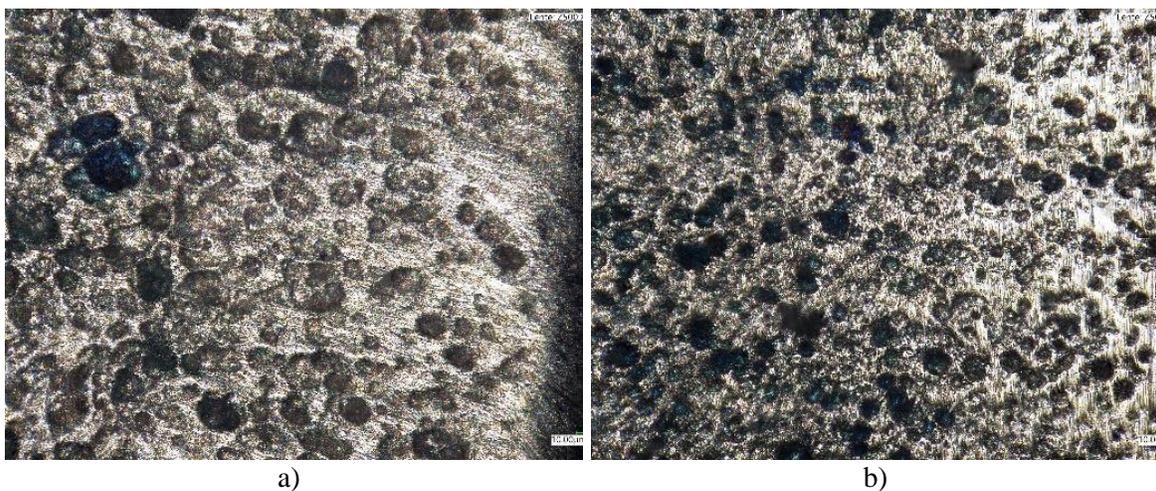
Condición	Ra promedio(μm)
VT15	42.6
VT8	35.3
IT2	37.2
IT3	80.9

En la Figura 5.9 se puede observar que la variable del tiempo es la que influye en el espesor del material, sin embargo, influye de manera negativa en la vida a fatiga del sustrato, esto quiere decir, que el fenómeno de fragilización por hidrógeno afecta al material cuando el hidrógeno tiene una interacción con la superficie del sustrato y penetran la estructura cristalina del metal provocando el daño por fragilización. Entre mayor sea el tiempo de deposición, mayor será la fragilización.

### 5.2.3 Análisis de las micrografías

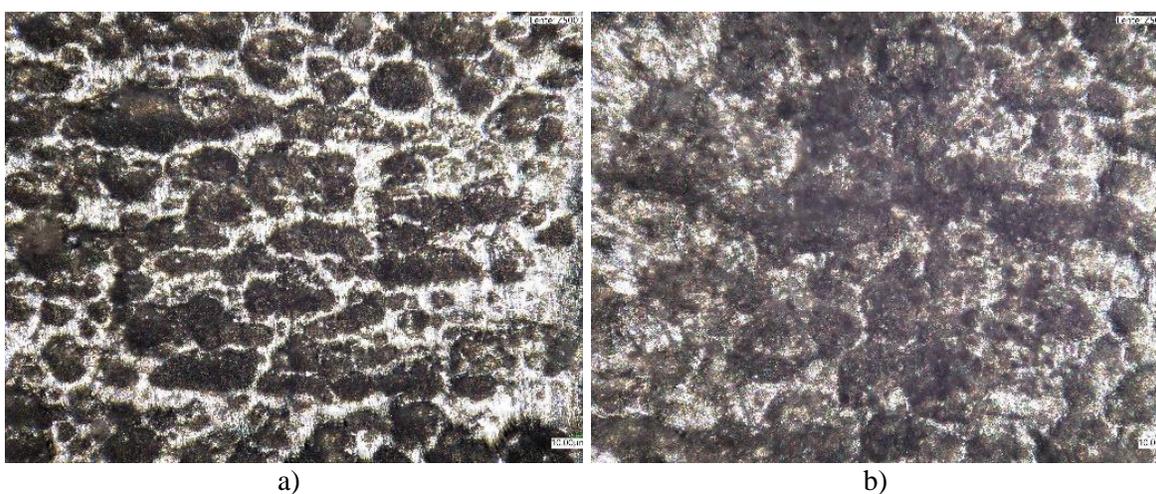
De acuerdo con los resultados obtenidos, el espesor es directamente proporcional al tiempo (entre mayor es el tiempo de recubrimiento mayor es el espesor, pero la vida a fatiga de las muestras reduce significativamente). El tamaño de grano se ve incrementado principalmente cuando aumenta el voltaje y la temperatura (recordando que, al aumentar el voltaje, la

temperatura aumenta de igual manera). En la Figura 5.10 se muestra un comparativo del tamaño de grano entre la condición VT15 y VT8. La Figura 5.10a representa la condición VT15 en la cual se puede observar que el tamaño de grano es mayor que el de la Figura 5.10b que representa la condición VT8.



**Figura 5.10** Micrografías de dos películas representativas, recubiertas con ácido acético con concentración de 0.24% v/v controlando la tensión eléctrica a: a) 15v y b) 8V.

En la Figura 5.11 se muestra un comparativo del tamaño de grano entre la condición IT2 y IT3. Cuando se controló la corriente, el voltaje incremento de 9V a 28V, por ende, la temperatura incremento. La Figura 5.11a representa la condición IT2 en la cual se puede observar que el tamaño de grano es igual pero el espesor es menor que el de la Figura 5.11b.



**Figura 5.11** Micrografías de dos películas representativas, recubiertas con ácido acético con concentración de 0.24% v/v controlando la corriente eléctrica a 0.8A en un tiempo de: a) 2 horas y b) 3 horas.

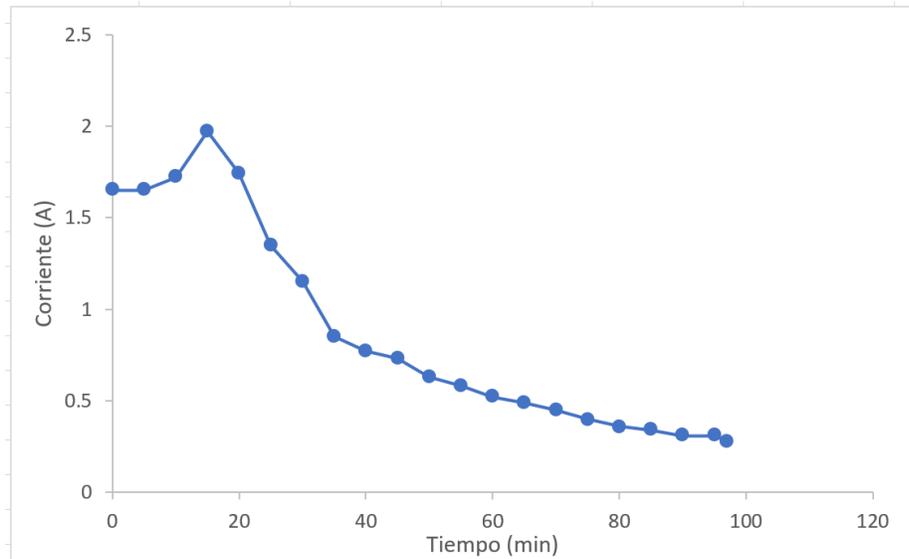
Asimismo, se comparó el tamaño de grano obtenidos en la Figura 5.10 con la Figura 5.11 y se observa claramente que cuando incrementa el valor del voltaje y la temperatura, mayor es el tamaño de grano.

Los resultados obtenidos de número de ciclos de las muestras recubiertas indican que el espesor del recubrimiento no influye en la vida a fatiga del material (las muestras con mayor espesor son las que tuvieron menor vida a fatiga), pero la reducción no se debe al espesor sino al tamaño de grano y el fenómeno de fragilización por hidrogeno (entre mayor sea el tiempo de deposición, mayor es la fragilización por hidrogeno). Relacionando la vida a fatiga con el tamaño de grano que se puede observar en las micrografías Figura 5.10 y Figura 5.11 (ver las demás micrografías en Anexo A Figura A.10), se puede deducir que el tamaño de grano influye en la vida del material. Entre más grande sea el tamaño de grano, menor es la vida del material y entre mas pequeño es el tamaño de grano, la vida del material es mayor. Esto se debe a que cuando el tamaño de grano es mayor, se generan huecos (Figura 5.11) y cuando el tamaño de grano es menor, es más compacto (Figura 5.10).

#### **5.2.4 Control de las variables de electrodeposición**

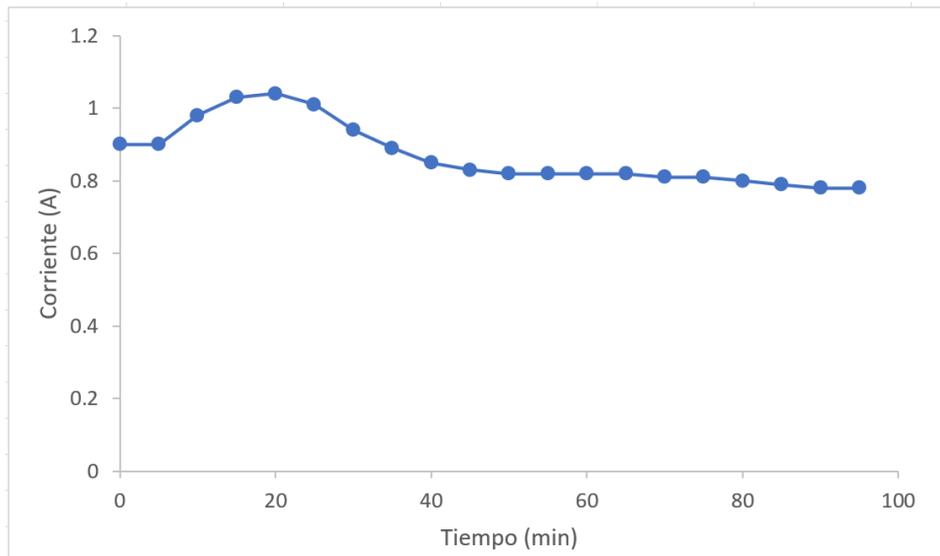
Se recubrieron muestras de aluminio 6061-T6 con grafito por la técnica de electrodeposición, con ácido acético como electrolito ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) y las variables del proceso son: el tiempo, voltaje y corriente. Se elaboró un diseño paramétrico de 4 condiciones diferentes: a) condición VT15 que es voltaje de 15V como variable constante en un tiempo de 1.63 horas, b) condición VT8 que es voltaje de 8V como variable constante en un tiempo de 1.5 horas, c) condición IT2 que es la corriente de 0.8A como variable constante en un tiempo de 2 horas y d) condición IT3 que es la corriente de 0.8A como variable constante en un tiempo de 3 horas.

En la Figura 5.12 se muestra el comportamiento de la variable no controlada para la condición VT15. En la gráfica se muestra que durante transcurre el tiempo, en 20 minutos aproximadamente se obtiene un aumento de corriente hasta llegar a un punto de saturación y posteriormente comienza a disminuir de forma proporcional hasta llegar a un mínimo punto de equilibrio eléctrico.



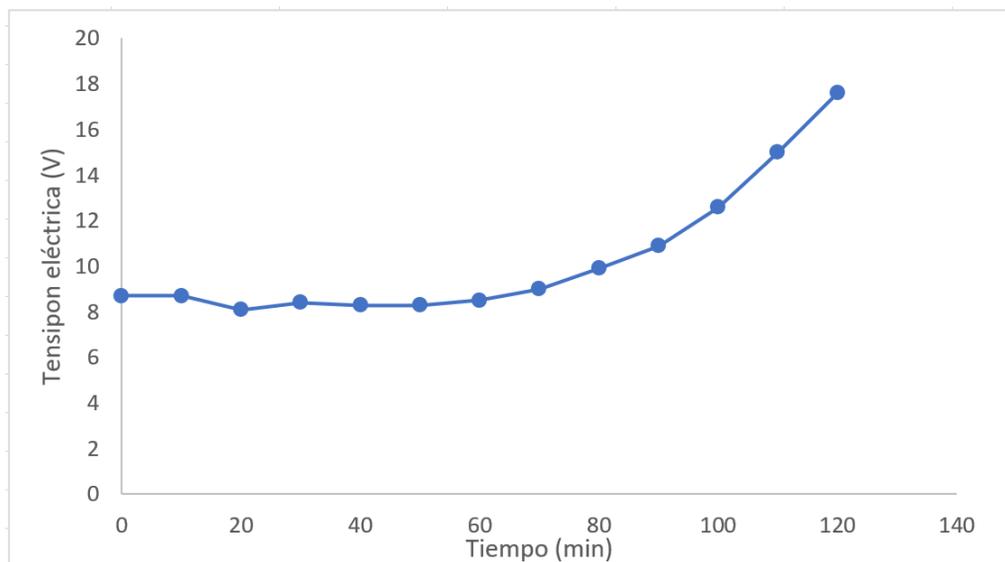
**Figura 5.12** Comportamiento de la variable no controlable para la condición VT15.

En la Figura 5.13 se muestra el comportamiento de la variable no controlada para la condición VT8. En la gráfica se puede observar que la condición VT8 tiene un comportamiento similar a la condición VT15 en los primeros 20 minutos, sin embargo, posteriormente a los 20 minutos la manera de disminuir es más lenta para la condición VT8. Por otro lado, los espesores para las condiciones VT8 y VT15 son similares.



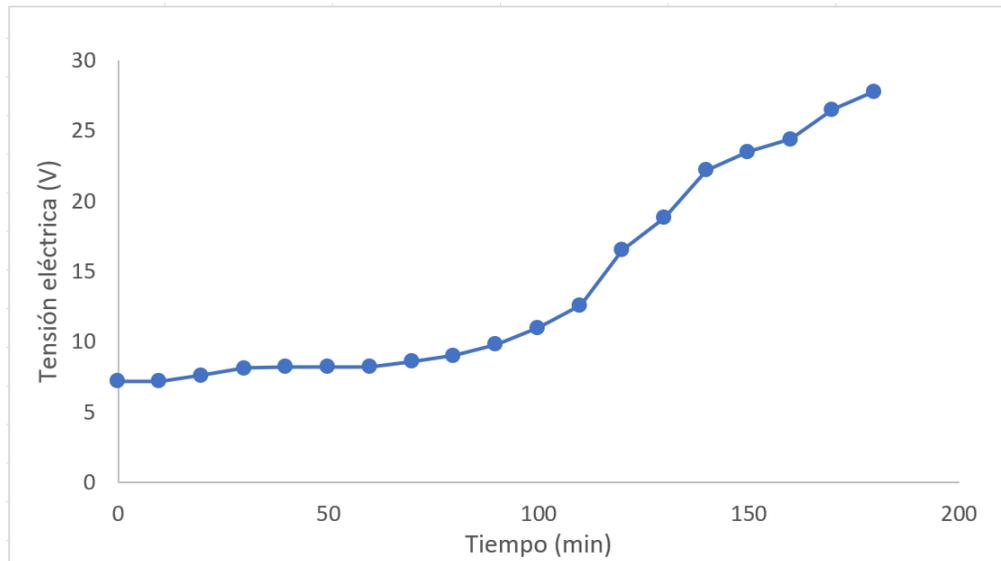
**Figura 5.13** Comportamiento de la variable no controlable para la condición VT8.

En la Figura 5.14 se muestra el comportamiento de la variable no controlada para la condición IT2. Cuando la variable controlada es el corriente, la tensión eléctrica tiene un comportamiento exponencial, esto se debe a que se requiere más tensión eléctrica para mantener la corriente a 0.8A.



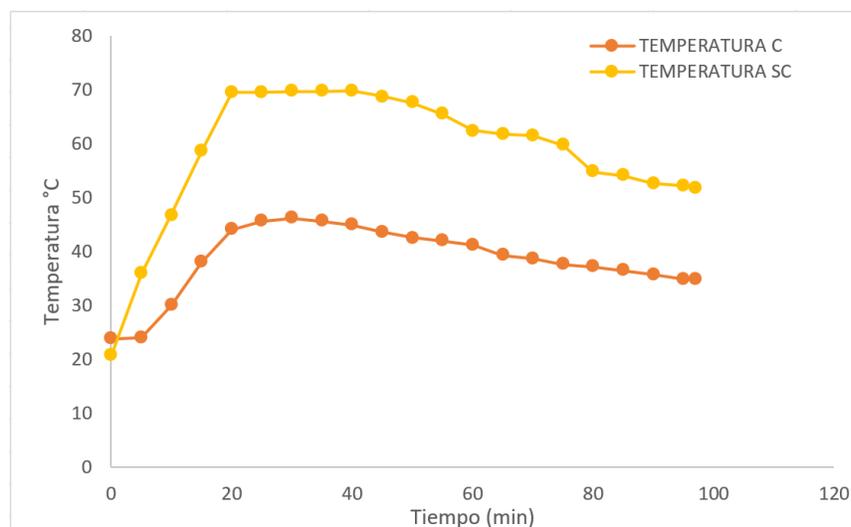
**Figura 5.14** Comportamiento de la variable no controlable para la condición IT2.

En la Figura 5.15 se muestra el comportamiento de la variable no controlada para la condición IT3. En la gráfica se puede observar claramente que es una extensión de la Figura 5.14, con la diferencia de que en un punto comienza a inclinarse en un sentido contrario. La condición IT2 y IT3 son las que obtuvieron mayor espesor. Esto se debe al incremento de la tensión eléctrica y del tiempo.



**Figura 5.15** Comportamiento de la variable no controlable para la condición IT3.

En el proceso de electrodeposición se presentó un incremento de temperatura hasta alcanzar cerca de los 70°C, por tal motivo, se elaboró un sistema hidráulico para poder controlar la temperatura y se logró disminuir entre 33% – 48%. En la Figura 5.16 se muestra una gráfica del comportamiento de la temperatura controlada por el sistema hidráulico (TEMPERATURA C) y de la temperatura no controlada (TEMPERATURA SC) para la condición VT15.



**Figura 5.16** Comportamiento de la temperatura para la condición VT15.

En la Figura 5.17 se muestra una gráfica del comportamiento de la temperatura controlada por el sistema hidráulico (TEMPERATURA C) y de la temperatura no controlada (TEMPERATURA SC) para la condición VT8.

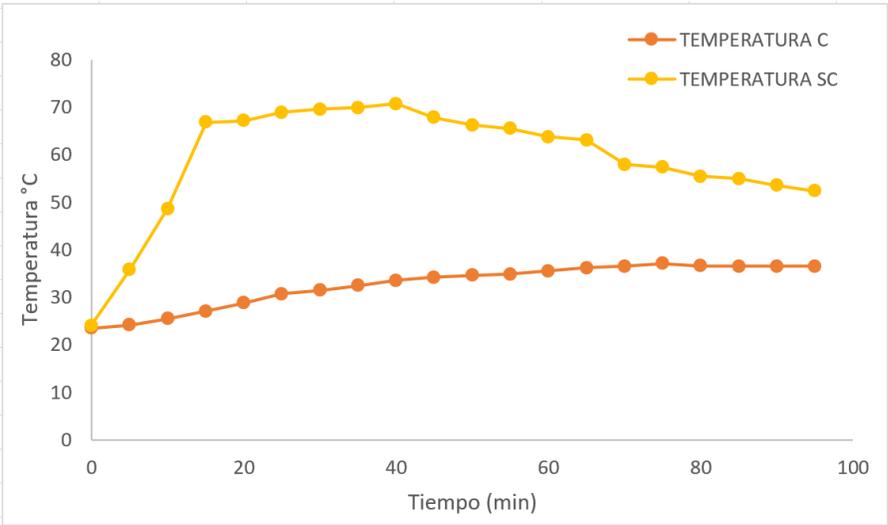


Figura 5.17 Comportamiento de la temperatura para la condición VT8.

En la Figura 5.18 se muestra una gráfica del comportamiento de la temperatura controlada por el sistema hidráulico (TEMPERATURA C) y de la temperatura no controlada (TEMPERATURA SC) para la condición IT2.

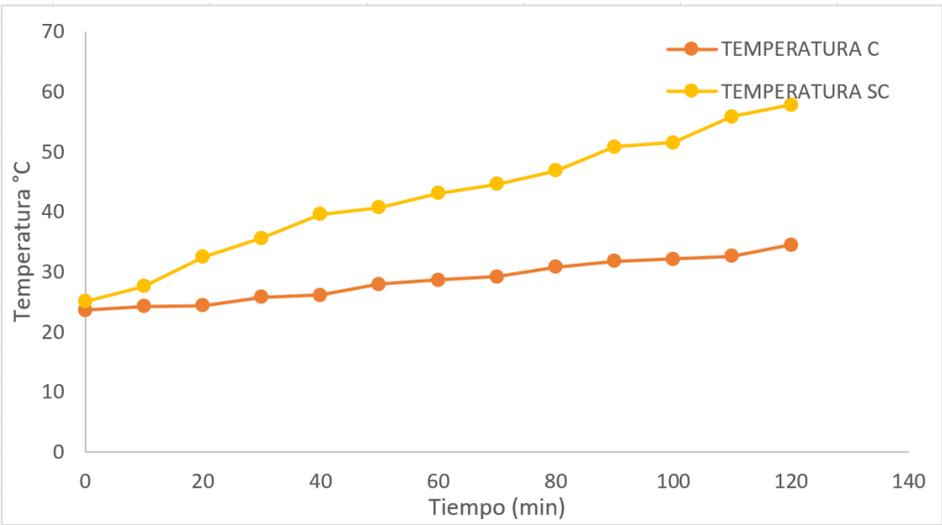
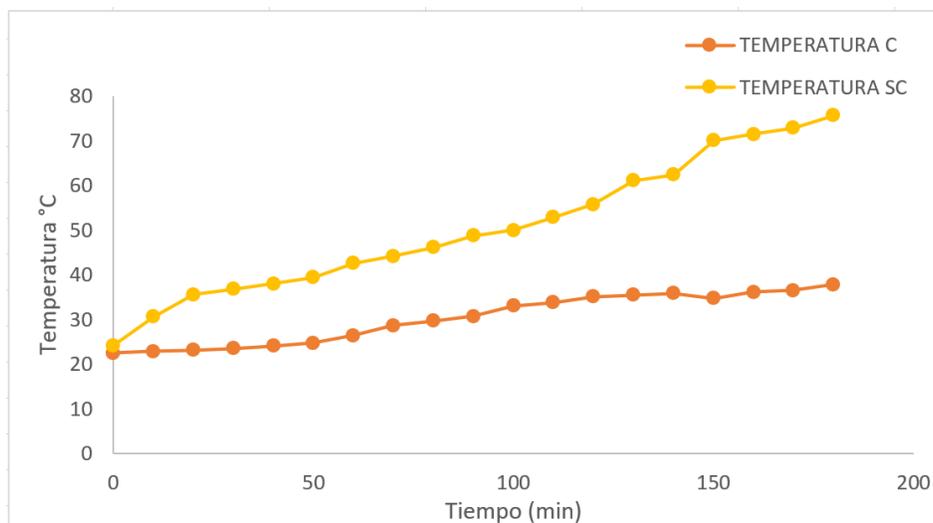


Figura 5.18 Comportamiento de la temperatura para la condición IT2.

En la Figura 5.19 se muestra una gráfica del comportamiento de la temperatura controlada por el sistema hidráulico (TEMPERATURA C) y de la temperatura no controlada (TEMPERATURA SC) para la condición IT3.



**Figura 5.19** Comportamiento de la temperatura para la condición IT3.

Al controlar la temperatura durante el proceso de electrodeposición, se logró obtener una ligera mejora sobre la vida a fatiga del material base, sin embargo, no es un fenómeno que influye en gran medida. Sin embargo, no se sabe cómo sería el comportamiento a temperaturas menores a 20°C, recordando que el aumento de temperatura incrementa el desprendimiento de hidrógeno y la precipitación de sales contaminantes.

### **5.3 Comparación del espesor del recubrimiento obtenido y fórmula de Faraday**

Las leyes de la electrólisis o leyes de Faraday son fórmulas que expresan de manera numérica la cantidad depositada, es decir, se puede calcular la cantidad de material que se deposita o que ha corroído sobre otro material. En el capítulo anterior se determinó la fórmula de Faraday para obtener la masa de la sustancia producida en el electrodo y, dentro de la fórmula se relacionó el peso del recubrimiento en términos de densidad y la ecuación del volumen para obtener el espesor del recubrimiento (observar en el capítulo 3 las ecuaciones 3.1 a la 3.5 para ver el procedimiento). Obteniendo como resultado la siguiente ecuación:

$$x = \frac{ItM}{\rho AzF} \quad (5.1)$$

Los datos constantes para la condición IT2 y IT3 son: la corriente involucrada  $I = 0.8 \text{ A}$ , la masa molar de la sustancia  $M = 12.0107 \text{ g/mol}$ , la densidad del electrolito  $\rho = 2.25 \text{ g/cm}^3$ , el área de trabajo del electrodo  $A = 2.25 \text{ cm}^2$ , el número de electrones implicados en la reacción electroquímica  $z = 4$  y la constante de Faraday que representa  $F = 2.25 \text{ C/mol}$ .

**Tabla 5.18** Cálculo matemático del espesor del recubrimiento para la condición IT2.

Condición	Tiempo, s	Espesor, $\mu\text{m}$
IT2	7200	$x = 54.8\mu\text{m}$
IT3	10800	$x = 82.3\mu\text{m}$

**Tabla 5.19** Tabla comparativa de los datos de espesores obtenidos de forma experimental y matemática.

Condición	Espesor promedio ( $\mu\text{m}$ )	Valor teórico ( $\mu\text{m}$ )
IT2	37.2	54.8
IT3	80.9	82.3

Los datos obtenidos en la Tabla 5.19 de forma experimental con el microscopio óptico 3D y con la fórmula matemática de Faraday, se puede observar que en general tiene una similitud considerando la escala métrica. Para la condición IT2 se obtuvo un espesor entre  $24.3 \mu\text{m} - 45.08 \mu\text{m}$  (observar Tabla A.2 en Anexo A) con el microscopio óptico 3D y con la fórmula de Faraday se obtuvo un espesor de  $54.8 \mu\text{m}$ . Para la condición IT3 se obtuvo un espesor entre  $50.85 \mu\text{m} - 110.31 \mu\text{m}$  (observar Tabla A.2 en Anexo A) con el microscopio óptico 3D y con la fórmula de Faraday se obtuvo un espesor de  $82.3 \mu\text{m}$ . Considerando que la técnica de electrodeposición se hizo de una manera casera y no industrial.

## Conclusiones

En este trabajo se evaluó la calidad superficial del recubrimiento de carbono sobre el aluminio 6061-T6 aplicando la técnica de electrodeposición y se relacionó con la influencia de la vida a fatiga del material sometido a carga de amplitud constante por flexión rotativa, de acuerdo con el diseño paramétrico descrito en el capítulo 4. Los resultados obtenidos demostraron que:

- a) El tiempo de deposición influye en la vida a fatiga del material. Cuando el tiempo de deposición sobrepasa los 45 minutos disminuye la vida a fatiga del material de una manera significativa, esto se debe a la fragilización por hidrógeno cuando el hidrógeno penetra la estructura cristalina del material.
- b) La variable del tiempo tiene una tendencia sobre el incremento del espesor. Entre mayor sea el tiempo de deposición mayor será el espesor, sin embargo, la vida a fatiga es afectada (como se describe en el punto a), entre mayor sea el tiempo de deposición, menor será la vida a fatiga del material.
- c) Los datos obtenidos por la fórmula de Faraday y los datos experimentales son muy cercanos. La condición con mayor espesor fue para la condición IT3 confirmando que entre mayor sea el tiempo de deposición, mayor será el espesor del recubrimiento.
- d) Los fenómenos que influyeron en la reducción de la vida a fatiga del material en mayor medida fueron: 1) maquinado de las piezas en seco, 2) el lijado de las muestras debido a una carga pequeña aplicada al hacer contacto con la pieza provocando que se flexionara y 3) fragilización por hidrógeno.
- e) No se logró obtener un modelo fenomenológico que estimara la vida a fatiga del material base, debido a que no se obtuvo un incremento en la resistencia a fatiga del de las muestras recubiertas, sino que se obtuvo una reducción respecto al material base.

Las micrografías obtenidas demostraron que:

1. El tamaño de grano se ve incrementado cuando la temperatura y el voltaje aumenta en el proceso de electrodeposición.

2. Cuando el tamaño de grano es mas pequeño, esto hace que el recubrimiento sea más compacto.
3. Cuando el tamaño de grano es mas grande, esto genera zonas con más huecos.
4. El espesor no es una variable que predomina en la vida del material, sino el tamaño de grano es la variable que influye en la vida del material. Entre mas compacto sea el recubrimiento, mayor es la vida del material.

De acuerdo con el procedimiento experimental, se concluye que el aluminio es un material sensible a las temperaturas, diferentes procesos de manufactura y que, a pesar de las propiedades mecánicas favorables del material, cuando es sometido a diferentes procesos (térmicos, químicos, físicos, entre otros) existen muchos factores que disminuyen la vida a fatiga del material.

No se logró generar un modelo fenomenológico debido a que no se obtuvo un grupo de datos por condición.

## **Actividades futuras**

La naturaleza de la fatiga es multivariable y por esta razón, los componentes mecánicos estructurales fallan con mucha frecuencia. Aplicar recubrimientos sobre aleaciones de aluminio tienen comportamientos inconstantes. A continuación, se presentan algunas actividades futuras que se pueden considerar para el estudio de recubrimientos sobre aleaciones de aluminio:

- Estudio de los diferentes electrolitos y evaluar su efecto sobre los recubrimientos.
- Buscar alternativas de técnicas de recubrimientos para aleaciones de aluminio.
- Controlar variables y fenómenos que influyen sobre la vida a fatiga del material.
- Ampliar el número de muestras a analizar para obtener el espesor por cada condición y relacionar los datos con la fórmula de Faraday u obtener un modelo empírico.
- Analizar las muestras obtenidas en un microscopio electrónica de barrido.

## Referencias Bibliográficas

- [1] S. Baragetti, L. Lusvarghi, G. Bolelli, y F. Tordini, “Fatigue behaviour of 2011-T6 aluminium alloy coated with PVD WC/C, PA-CVD DLC and PE-CVD SiO<sub>x</sub> coatings”, *Surf. Coatings Technol.*, vol. 203, núm. 20–21, pp. 3078–3087, 2009, doi: 10.1016/j.surfcoat.2009.03.040.
- [2] H. Kovacı, A. F. Yetim, Baran, y A. Çelik, “Fatigue crack growth behavior of DLC coated AISI 4140 steel under constant and variable amplitude loading conditions”, *Surf. Coatings Technol.*, vol. 304, pp. 316–324, 2016, doi: 10.1016/j.surfcoat.2016.07.045.
- [3] J. Mayén *et al.*, “Part 1: Design and development of new sustainable coatings applied on aluminium 6061 alloy-RRA heat treated for engineering applications”, *Surf. Coatings Technol.*, vol. 328, pp. 488–498, 2017, doi: 10.1016/j.surfcoat.2017.09.012.
- [4] Y. González López, “Evaluación de la influencia de tratamientos superficiales en la vida a la fatiga de materiales”, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), 2019.
- [5] Y. Namba, “Attempt to grow diamond phase carbon films from an organic solution”, *J. Vac. Sci. Technol. A Vacuum, Surfaces, Film.*, vol. 10, núm. 5, pp. 3368–3370, 1992, doi: 10.1116/1.577829.
- [6] W. Schütz, “A history of fatigue”, *Eng. Fract. Mech.*, vol. 54, núm. 2, pp. 263–300, 1996, doi: 10.1016/0013-7944(95)00178-6.
- [7] C.-C. P. Mihai Valentin Predoi, Andrei Craifaleanu, Mihaela David, George-Catalin Ion, “New Techniques Used for Structural Life Time Estimation Using Probabilistic Techniques”, vol. 3, núm. 2, 2006.
- [8] ASM International Handbook Committee, *Fatigue and Fracture Vol.19*. 1996.
- [9] E. V. Arcieri, S. Baragetti, y E. Borzini, “Bending fatigue behavior of 7075-aluminum alloy”, *Key Eng. Mater.*, vol. 774 KEM, pp. 1–6, 2018, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.774.1.
- [10] S. Baragetti, E. Borzini, Božic, y E. V. Arcieri, “On the fatigue strength of uncoated and DLC coated 7075-T6 aluminum alloy”, *Eng. Fail. Anal.*, vol. 102, núm. March, pp. 219–225, 2019, doi: 10.1016/j.engfailanal.2019.04.035.
- [11] S. Baragetti, R. Gerosa, y F. Villa, “Fatigue behaviour of DLC coated Al 7075-T6 alloy in an aggressive mixture”, *Key Eng. Mater.*, vol. 627, pp. 81–84, 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.627.81.
- [12] S. Baragetti, R. Gerosa, y F. Villa, “Effects of PVD DLC coating on 7075-T6 fatigue strength at high and low number of cycles”, *Key Eng. Mater.*, vol. 713, pp. 50–53, 2016, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.713.50.
- [13] P. H. Shipway, *The range of surface coating methods*. Woodhead Publishing Limited, 2006.

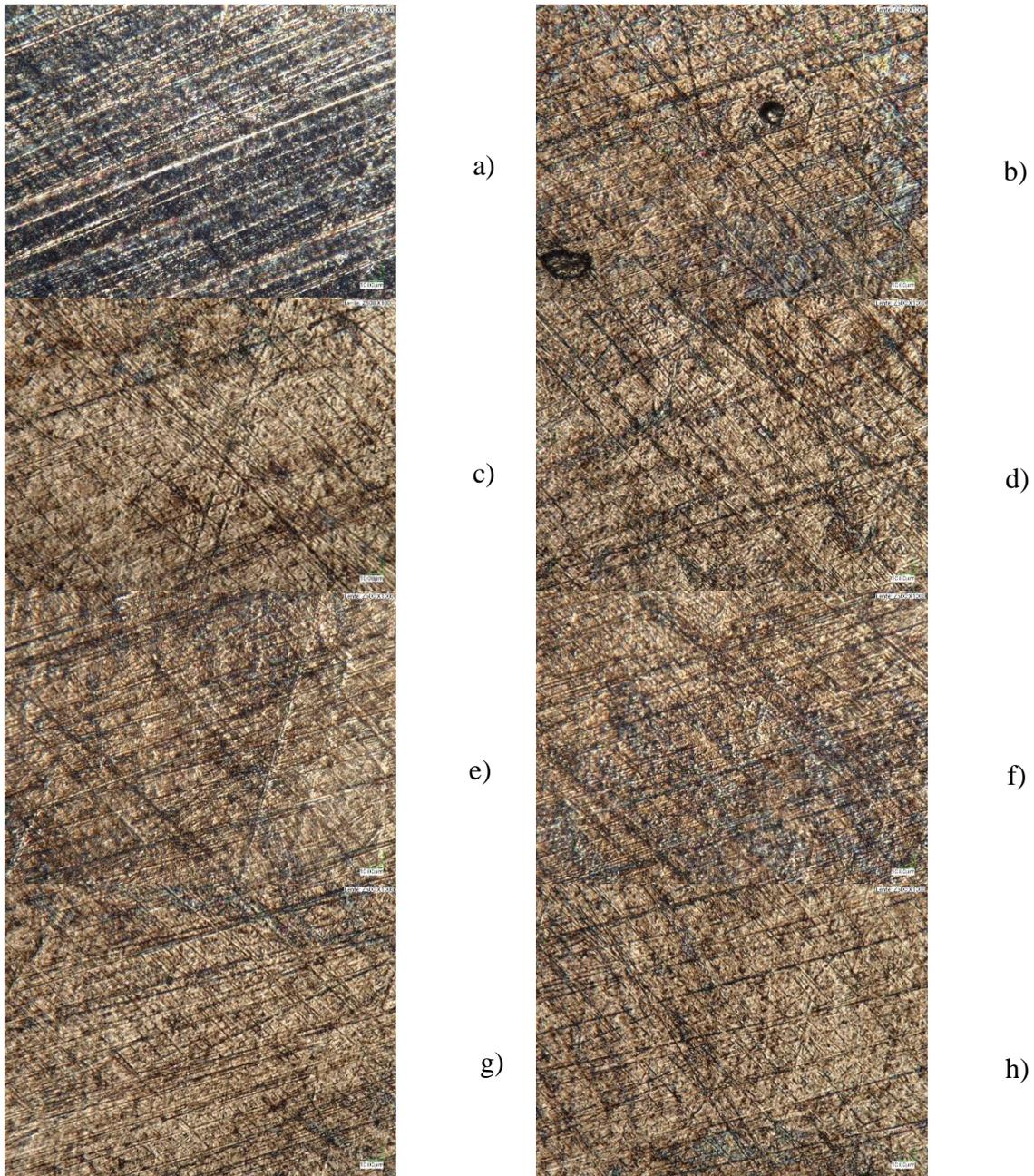
- [14] D. W. Wheeler, *Chemical vapour deposition methods for protection against wear*, núm. Vc. Woodhead Publishing Limited, 2006.
- [15] S. J. Bull, *Physical vapour deposition methods for protection against wear*. Woodhead Publishing Limited, 2006.
- [16] J. Enrique, “Teoría de la electrodeposición de metales. Parámetros que controlan dicha deposición y control de calidad de los electrodeósitos metálicos obtenidos.”, vol. III, pp. 201–219, 1989.
- [17] C. P. De León, C. Kerr, y F. C. Walsh, “Electroless plating for protection against wear”, *Surf. Coatings Prot. Against Wear*, pp. 184–225, 2006, doi: 10.1533/9781845691561.184.
- [18] L. J. Ramirez, “Fatiga de aleaciones de aluminio aeronáutico con nuevos tipos de anodizado de bajo impacto ambiental y varios espesores de recubrimiento”, 2010.
- [19] S. Gupta, M. Pal Chowdhury, y A. K. Pal, “Synthesis of DLC films by electrodeposition technique using formic acid as electrolyte”, *Diam. Relat. Mater.*, vol. 13, núm. 9, pp. 1680–1689, 2004, doi: 10.1016/j.diamond.2004.02.006.
- [20] S. Gupta, R. K. Roy, B. Deb, S. Kundu, y A. K. Pal, “Low voltage electrodeposition of diamond-like carbon films”, *Mater. Lett.*, vol. 57, núm. 22–23, pp. 3479–3485, 2003, doi: 10.1016/S0167-577X(03)00102-2.
- [21] R. K. Roy, B. Deb, B. Bhattacharjee, y A. K. Pal, “Synthesis of diamond-like carbon film by novel electrodeposition route”, *Thin Solid Films*, vol. 422, núm. 1–2, pp. 92–97, 2002, doi: 10.1016/S0040-6090(02)00976-8.
- [22] R. Paul, S. Dalui, S. N. Das, R. Bhar, y A. K. Pal, “Hydrophobicity in DLC films prepared by electrodeposition technique”, *Appl. Surf. Sci.*, vol. 255, núm. 5 PART 1, pp. 1705–1711, 2008, doi: 10.1016/j.apsusc.2008.06.015.
- [23] H. Hassannejad, F. Bogani, M. Boniardi, A. Casaroli, C. Mele, y B. Bozzini, “Electrodeposition of DLC films on carbon steel from acetic acid solutions”, *Trans. Inst. Met. Finish.*, vol. 92, núm. 4, pp. 183–188, 2014, doi: 10.1179/0020296714Z.000000000178.
- [24] A. Gallegos-Melgar *et al.*, “Characterization of a C-based coating applied on an AA6063 alloy and developed by a novel electrochemical synthesis route”, *Coatings*, vol. 10, núm. 2, pp. 1–15, 2020, doi: 10.3390/coatings10020145.
- [25] M. C. Salvadori, D. R. Martins, y M. Cattani, “DLC coating roughness as a function of film thickness”, *Surf. Coatings Technol.*, vol. 200, núm. 16–17, pp. 5119–5122, 2006, doi: 10.1016/j.surfcoat.2005.05.030.
- [26] M. G. Casapia, “Evaluación de las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio 2024 de uso comercial expuesta a fragilización por hidrógeno”, 2019.
- [27] J. E. P. Espinosa, “Análisis de falla de fatiga por flexión en la raíz de un diente de engranaje recto con Pro/Engineer”, Universidad Austral de Chile, 2007.
- [28] J. J. Duga *et al.*, “The Economic Effects of Fracture in the United States”, *Natl. Bur.*

*Stand. Spec. Publ.*, 1983.

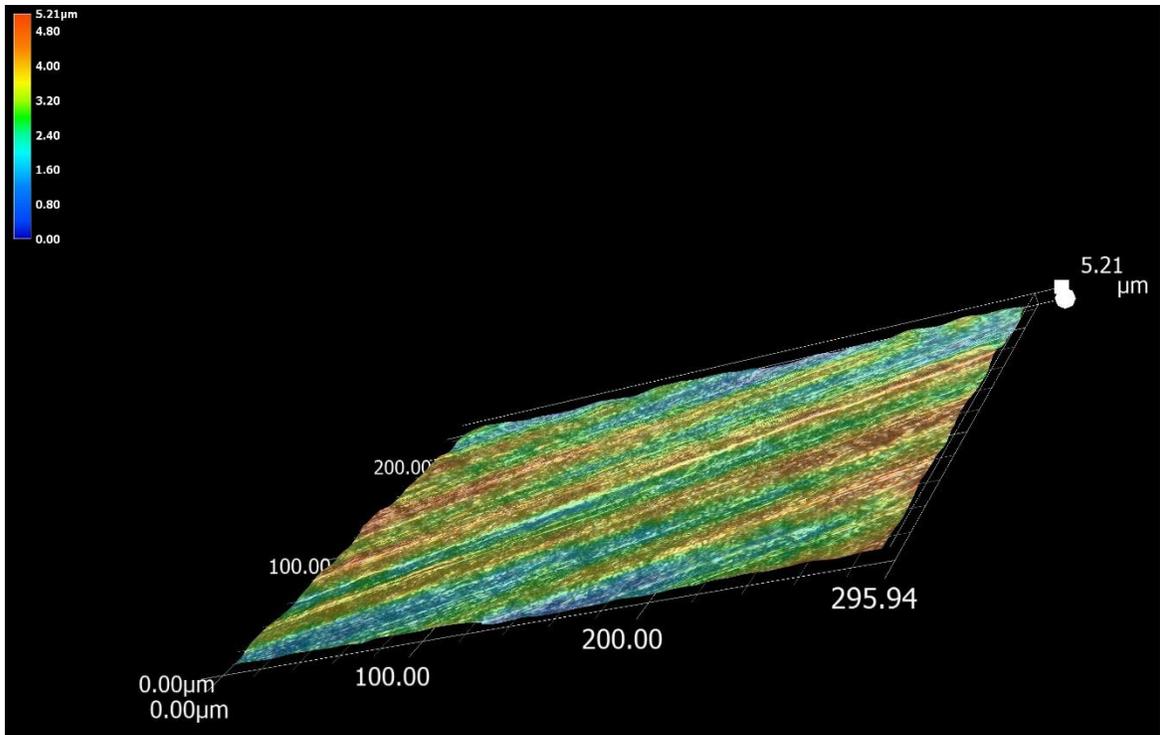
- [29] E. Ghassemieh, “Materials in Automotive Application, State of the Art and Prospects”, *New Trends Dev. Automot. Ind.*, núm. September, pp. 365–394, 2011, doi: 10.5772/13286.
- [30] G. Thorwarth, C. Hammerl, M. Kuhn, W. Assmann, B. Schey, y B. Stritzker, “Investigation of DLC synthesized by plasma immersion ion implantation and deposition”, *Surf. Coatings Technol.*, vol. 193, núm. 1-3 SPEC. ISS., pp. 206–212, 2005, doi: 10.1016/j.surfcoat.2004.07.061.
- [31] E. S. Puchi-Cabrera *et al.*, “Fatigue behavior of a 316L stainless steel coated with a DLC film deposited by PVD magnetron sputter ion plating”, *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 527, núm. 3, pp. 498–508, 2010, doi: 10.1016/j.msea.2009.09.030.
- [32] A. Grill, “Diamond-like carbon: State of the art”, *Diam. Relat. Mater.*, vol. 8, núm. 2–5, pp. 428–434, 1999, doi: 10.1016/s0925-9635(98)00262-3.
- [33] W. Ni, Y. T. Cheng, A. M. Weiner, y T. A. Perry, “Tribological behavior of diamond-like-carbon (DLC) coatings against aluminum alloys at elevated temperatures”, *Surf. Coatings Technol.*, vol. 201, núm. 6, pp. 3229–3234, 2006, doi: 10.1016/j.surfcoat.2006.06.045.
- [34] MatWeb Material Property Data, “Aluminum 6061-T6; 6061-T651”, *MatWeb*. [En línea]. Disponible en: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=b8d536e0b9b54bd7b69e4124d8f1d20a&ckck=1>. [Consultado: 09-abr-2020].
- [35] ASM Aerospace Specification Metals Inc., “Aluminum 6061-T6; 6061-T651”, *MatWeb*. [En línea]. Disponible en: <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=ma6061t6>. [Consultado: 09-abr-2020].
- [36] ASTM, “Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials Designation: E 466 – 96 (Reapproved 2002)e1 Standard”, *Astm Int.*, vol. 03, núm. Reapproved, pp. 4–8, 2002, doi: 10.1520/E0466-07.2.
- [37] ASTM, “Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life ( S-N ) and Strain-Life (  $\epsilon$ -N ) Fatigue Data 1”, *Annu. B. ASTM Stand.*, vol. i, núm. Reapproved, pp. 1–7, 2012, doi: 10.1520/E0739-10.2.
- [38] ASM International, “Fatigue”, *Elem. Metall. Eng. Alloy.*, pp. 243–264, 2008.
- [39] M. Metallurgy *et al.*, “Elements of Metallurgy and Engineering Alloys”, en *Elements of Metallurgy and Engineering Alloys*, editor F.C. Campbell, Ed. Copyright © 2008 ASM International®, 2008, pp. 243–264.
- [40] A. Vaško, J. Belan, y L. Kuchariková, “Comparison of low and high frequency fatigue tests”, *Prod. Eng. Arch.*, vol. 17, núm. 2017, pp. 14–17, 2017, doi: 10.30657/pea.2017.17.03.

- [41] U. Nava, "Electrodeposición y caracterización de recubrimientos de Ni-P", Centro de investigación y desarrollo tecnológico en electroquímica, 2013.
- [42] K. E. Petatan, "Efecto de la velocidad de avance en torneado CNC en seco y el acabado superficial en la vida a fatiga de una aleación de aluminio 6061-T6", Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Jornada de Ciencias y Tecnología Aplicada Vol.4/Num.1, Enero-Junio2021, pp. 235-240.

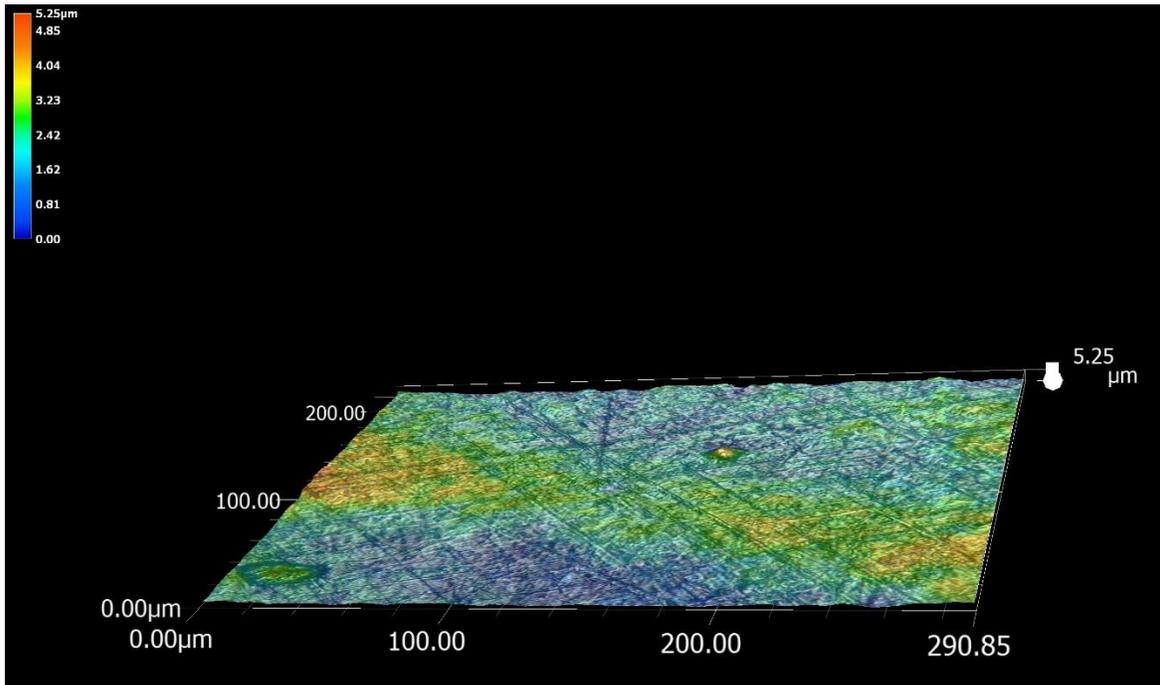
A continuación, se muestran las micrografías en 2D y 3D de las muestras de aluminio sin recubrimiento que representan la rugosidad.



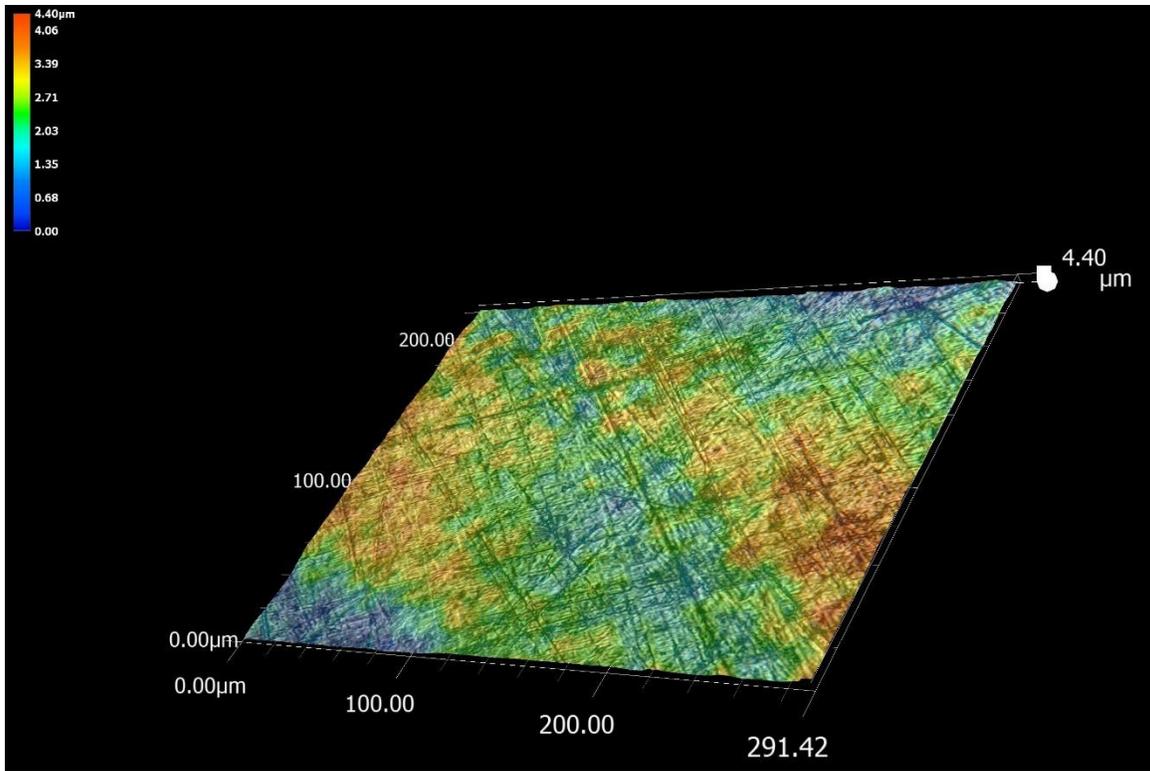
**Figura A.1** Micrografía 2D del aluminio 6061-T6: a) muestra SR-1 zona (c), b) muestra SR-2 zona (a), c) muestra SR-2 zona (b), d) muestra SR-2 zona (c), e) muestra SR-3 zona (a), f) muestra SR-3 zona (b), g) muestra SR-3 zona (c) y h) muestra SR-4 zona (a).



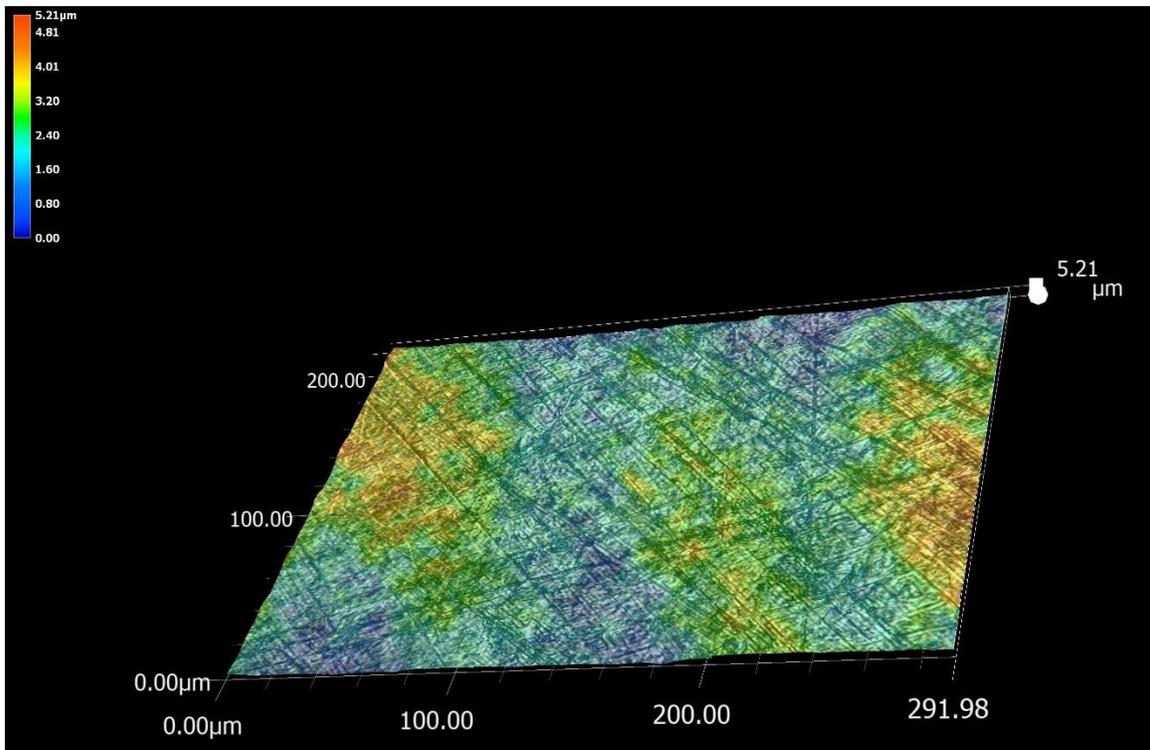
**Figura A.2** Micrografía 3D de la rugosidad del aluminio 6061-T6 de la muestra REV1 zona (c).



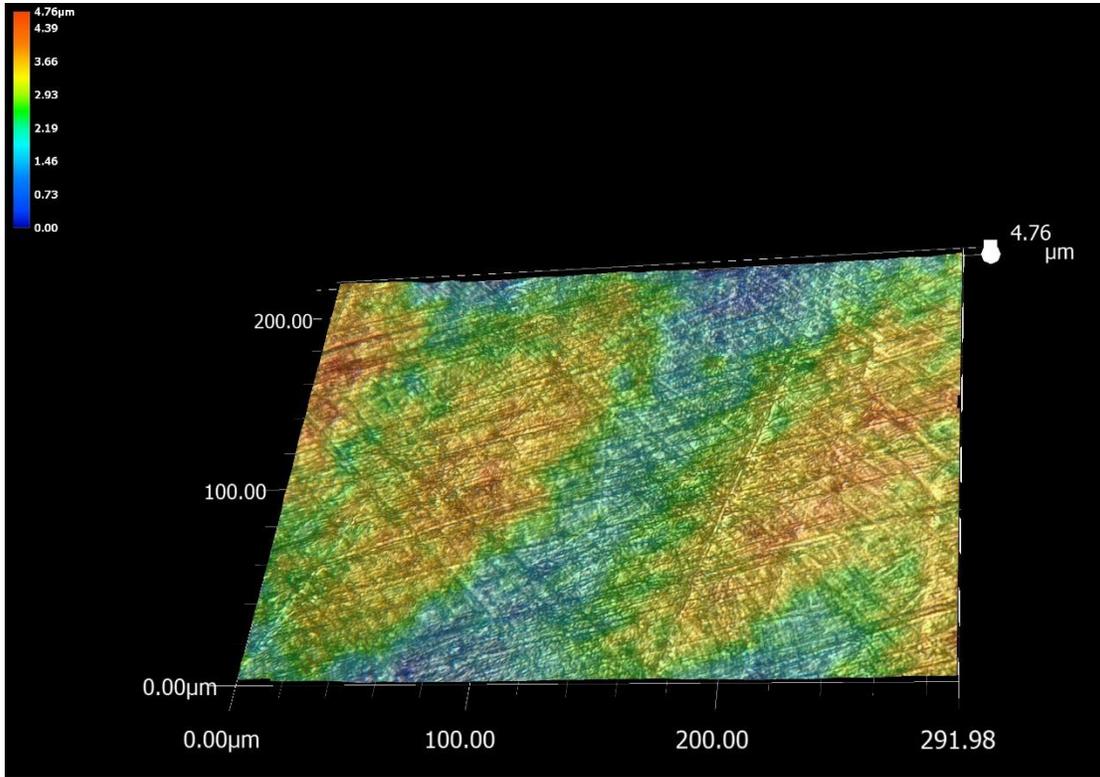
**Figura A.3** Micrografía 3D de la rugosidad del aluminio 6061-T6 de la muestra REV2 zona (a).



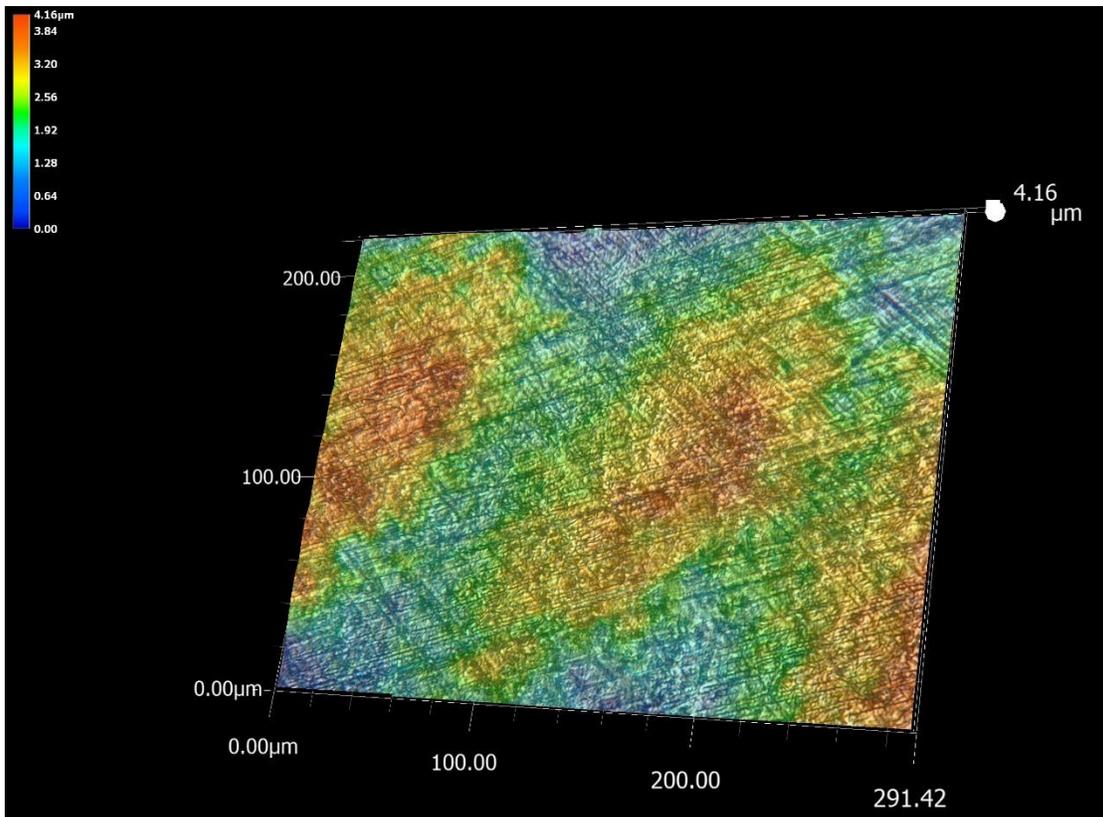
**Figura A.4** Micrografía 3D de la rugosidad del aluminio 6061-T6 de la muestra REV2 zona (b).



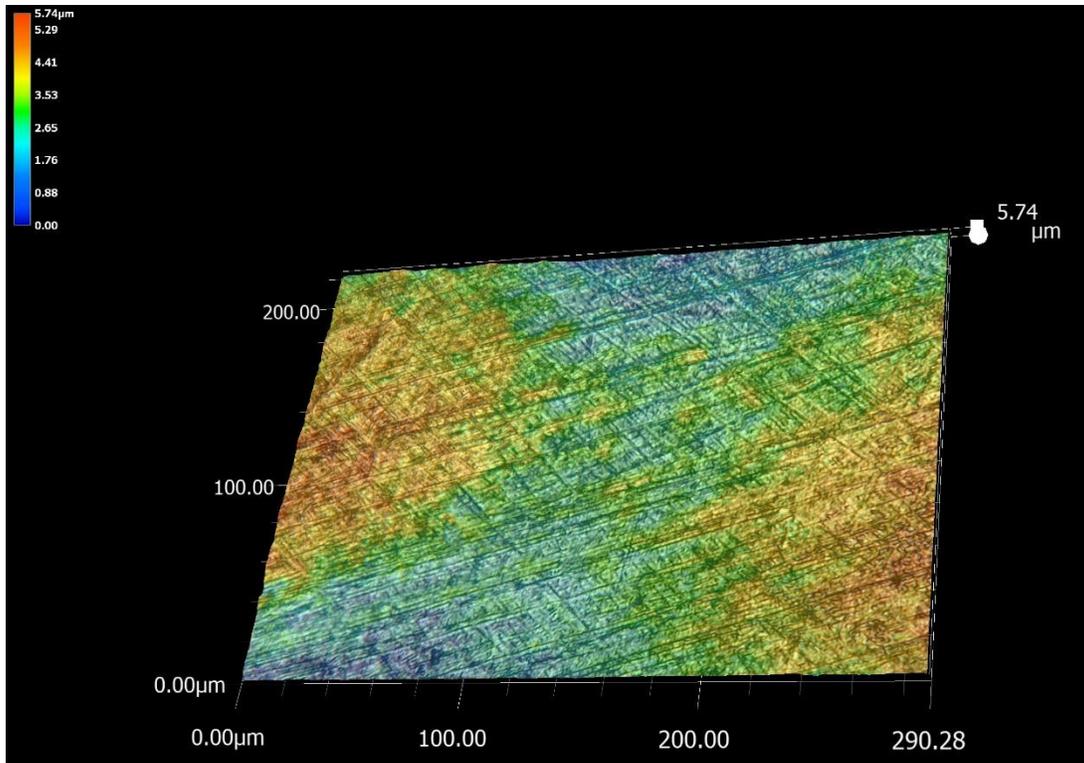
**Figura A.5** Micrografía 3D de la rugosidad del aluminio 6061-T6 de la muestra REV2 zona (c).



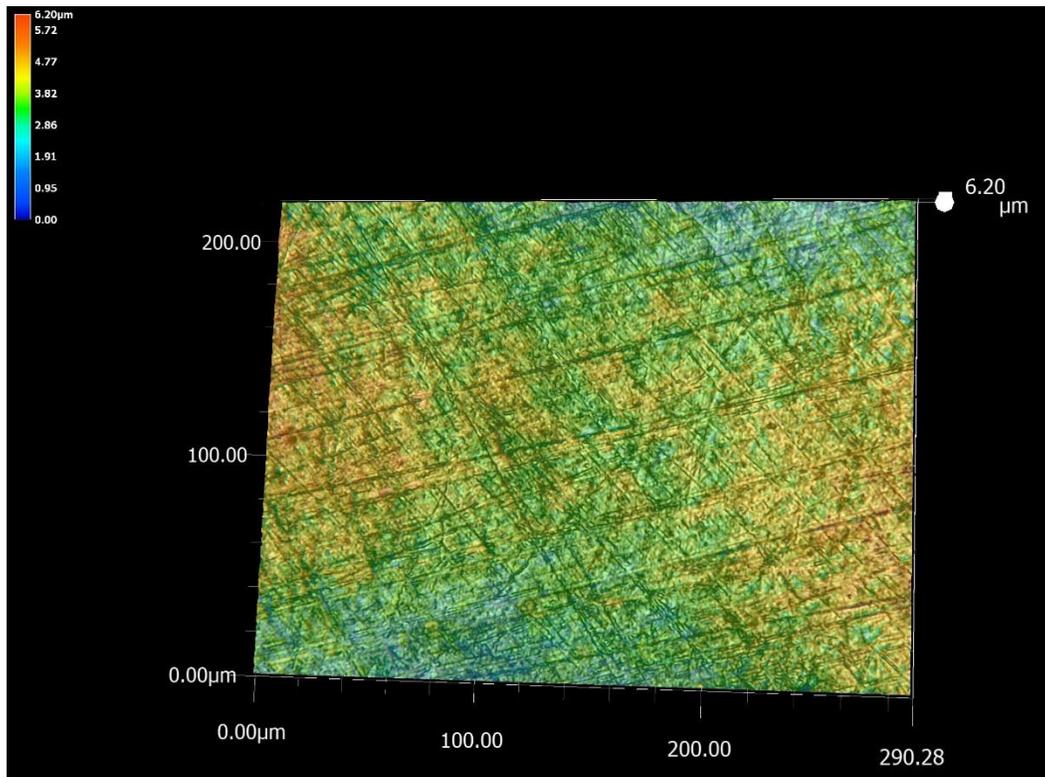
**Figura A.6** Micrografía 3D de la rugosidad del aluminio 6061-T6 de la muestra REV3 zona (a).



**Figura A.7** Micrografía 3D de la rugosidad del aluminio 6061-T6 de la muestra REV3 zona (b).



**Figura A.8** Micrografía 3D de la rugosidad del aluminio 6061-T6 de la muestra REV3 zona (c).

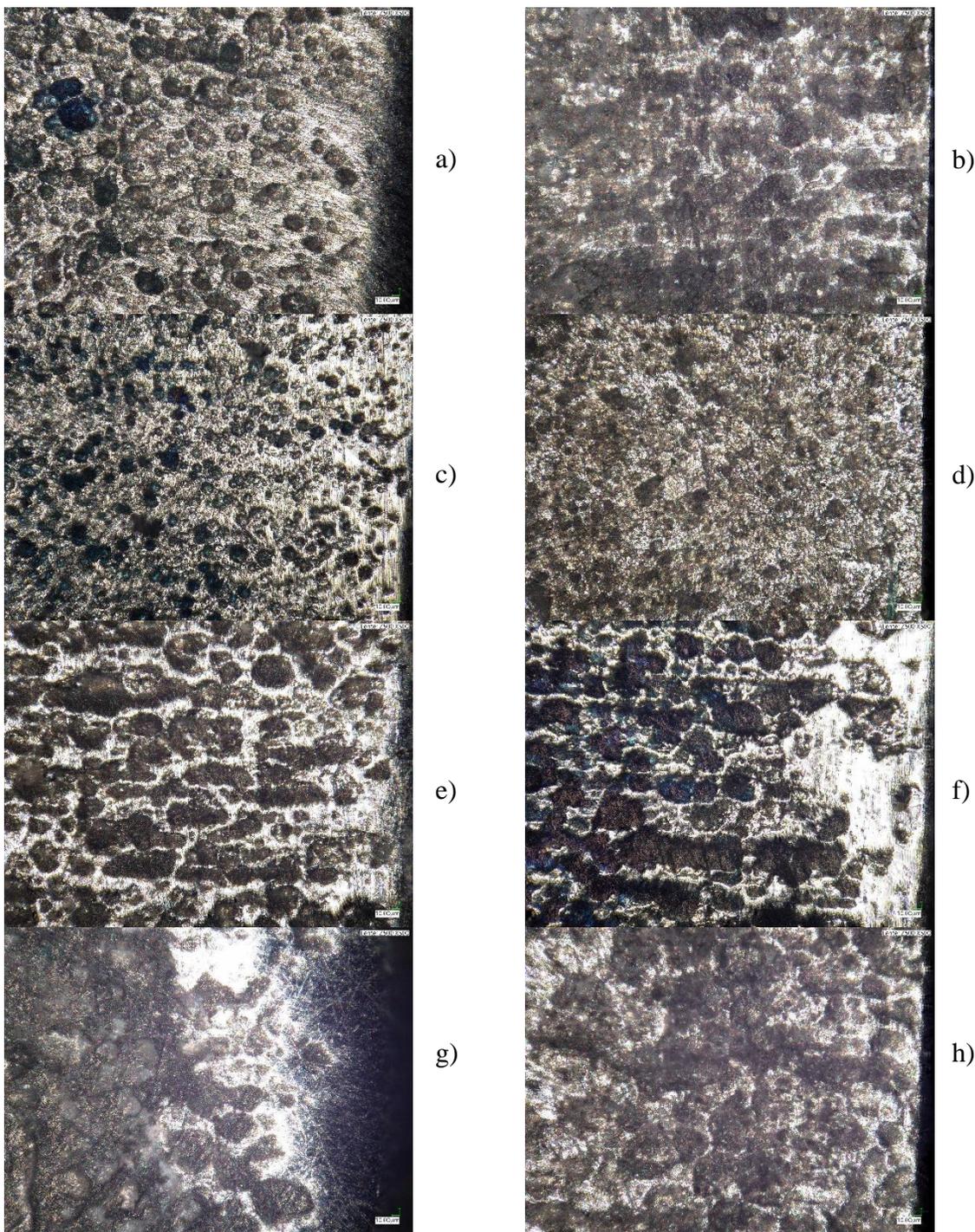


**Figura A.9** Micrografía 3D de la rugosidad del aluminio 6061-T6 de la muestra REV4 zona (a).

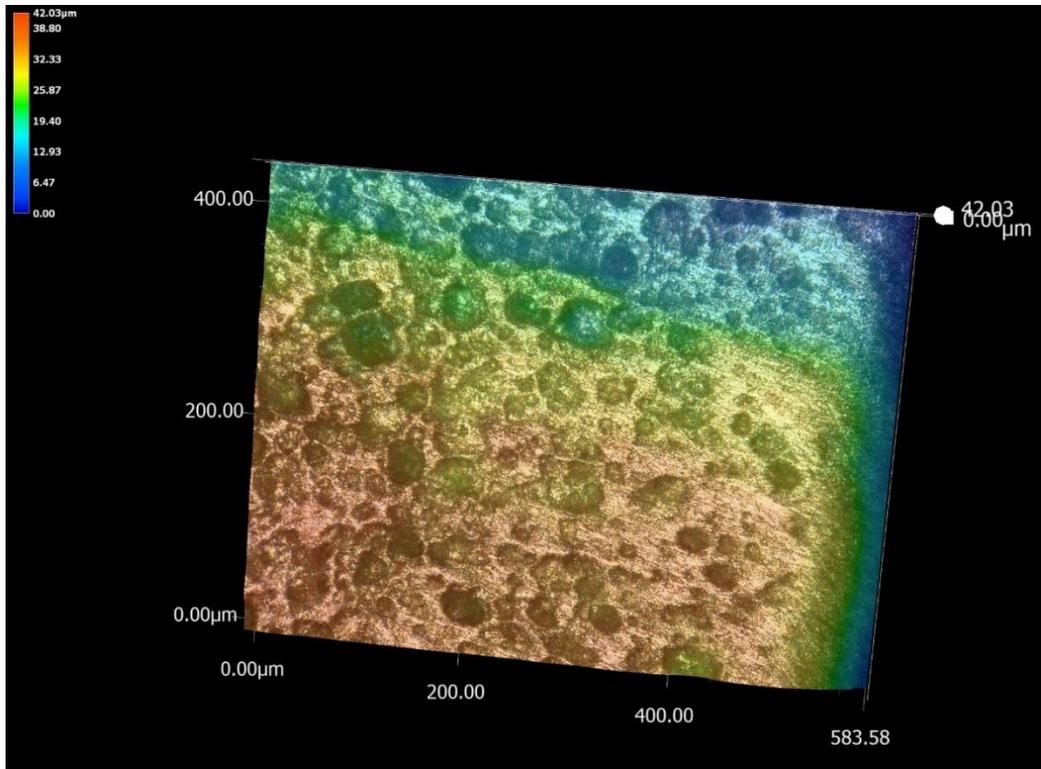
**Tabla A.1** Rugosidad en tres zonas por muestra del aluminio 6061-T6.

No. Probeta	Zonas de probeta	Ra ( $\mu\text{m}$ )
1	a	6.05
	b	5.68
	c	5.21
2	a	5.25
	b	4.4
	c	5.21
3	a	4.76
	b	4.16
	c	5.74
4	a	6.2
	b	5.21
	c	4.64
5	a	6.2
	b	5.68
	c	4.64
6	a	5.72
	b	5.27
	c	6.05
7	a	4.82
	b	5.32
	c	4.06
8	a	5.24
	b	5.12
	c	5.52
9	a	4.61
	b	4.46
	c	5.86
10	a	5.27
	b	4.28
	c	5.72

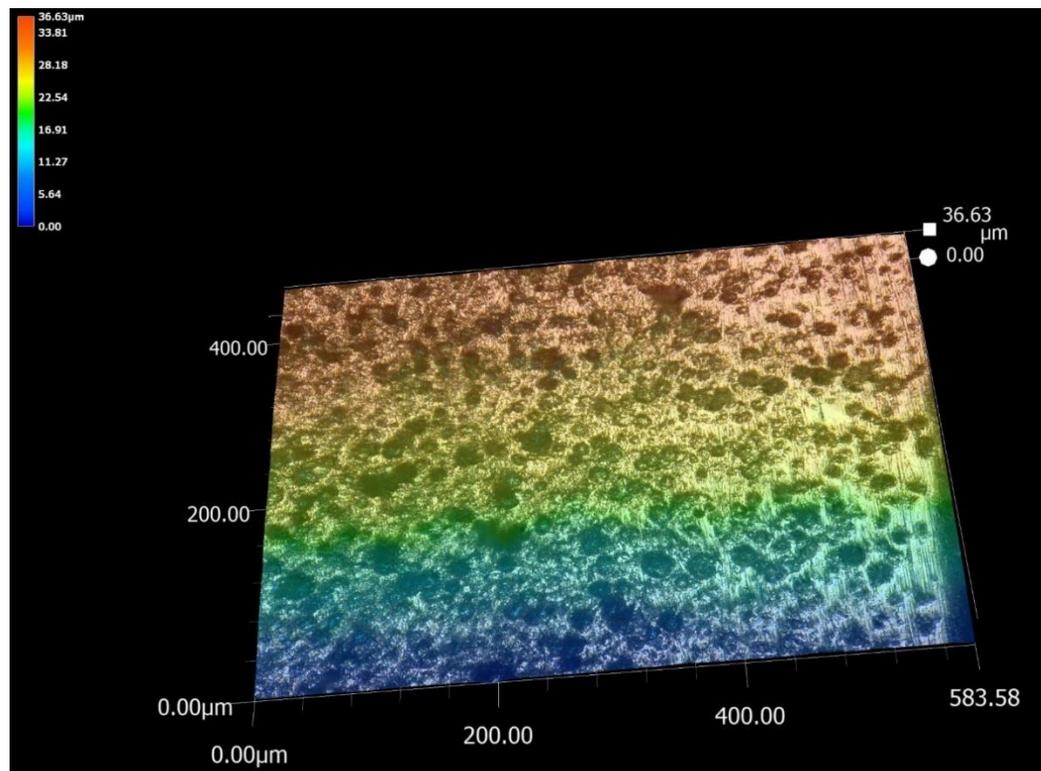
A continuación, se muestran micrografías en 2D y 3D de las recubiertas que representan el espesor de la película.



**Figura A.10** a) Micrografía 2D para: a) condición VT15 zona (a), b) condición VT15 zona (b), c) condición VT8 zona (a), d) condición VT8 zona (b), e) condición IT2 zona (a), f) condición IT2 zona (b), g) condición IT3 zona (a) y h) condición IT3 (b).



**Figura A.11** Micrografía 3D del espesor del recubrimiento para la condición VT15 sobre la zona (a).



**Figura A.12** Micrografía 3D del espesor del recubrimiento para la condición VT8 sobre la zona (a).

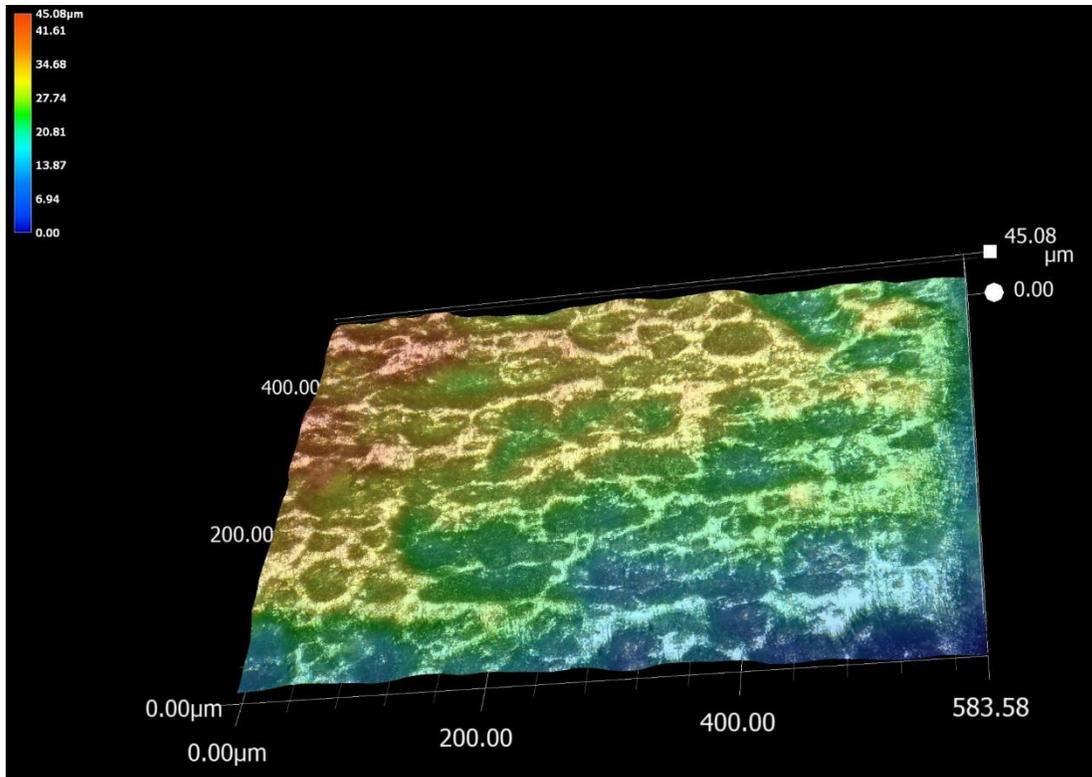


Figura A.13 Micrografía 3D del espesor del recubrimiento para la condición IT2 sobre la zona (a).

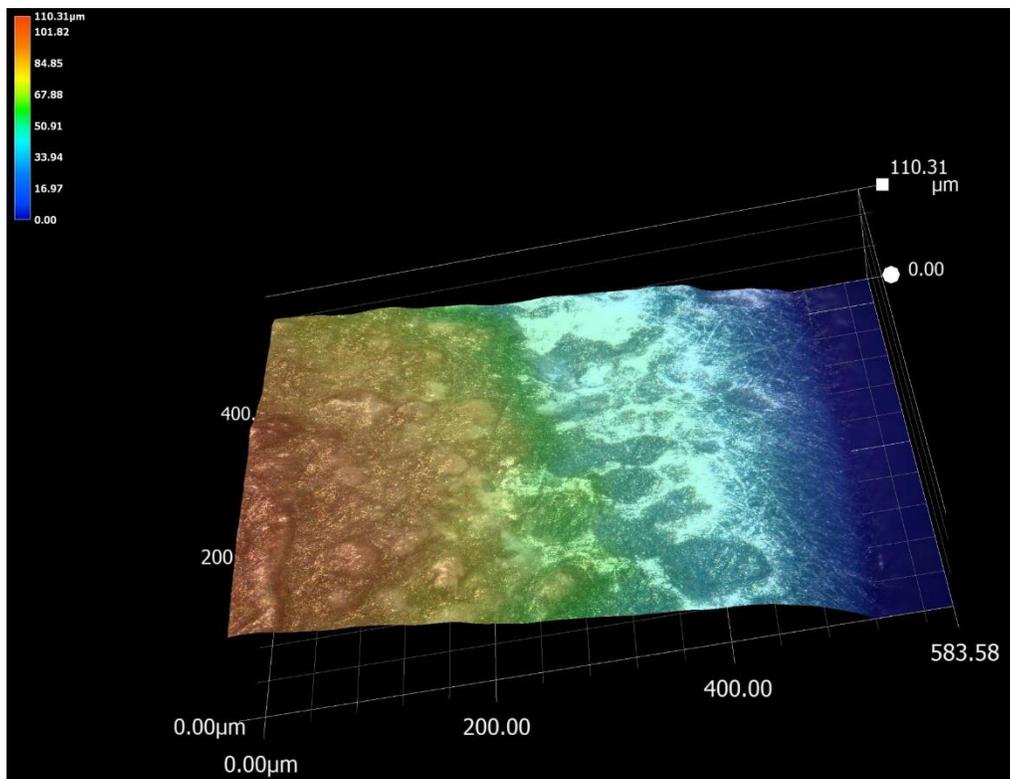


Figura A.14 Micrografía 3D del espesor del recubrimiento para la condición IT3 sobre la zona (a).

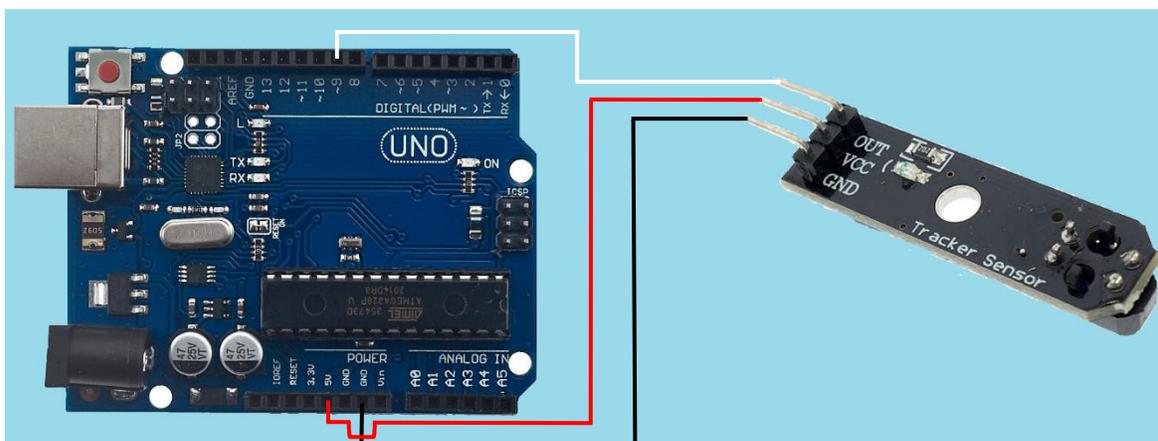
**Tabla A.2** Espesor del recubrimiento en tres zonas por condición.

Condición	Zonas de probeta	Ra ( $\mu\text{m}$ )
VT15	a	42.03
	b	37.72
	c	48.18
VT8	a	36.63
	b	33.97
	c	91.3
IT2	a	45.08
	b	42.21
	c	24.3
IT3	a	110.31
	b	50.85
	c	81.56

```
CONTADOR
const int sensorPin = 9;
long conta = 0;
long value = 0;
void setup() {
  Serial.begin(2000000); //iniciar puerto serie
  pinMode(sensorPin , INPUT); //definir pin como entrada
}

void loop(){
  value = digitalRead(sensorPin ); //lectura digital de pin
  if (value == HIGH )
  {
    conta++;
    Serial.println(conta);
    delay(33);
  }
}
```

**Figura B.1** Programa para el conteo de número de ciclos para la máquina de flexión rotativa.



**Figura B.2** Diagrama de conexiones (circuito eléctrico) del sensor infrarrojo modelo TCRT5000 para el contador de ciclos para la máquina de flexión rotativa de acuerdo con el programa escrito en la Fig. B.1.