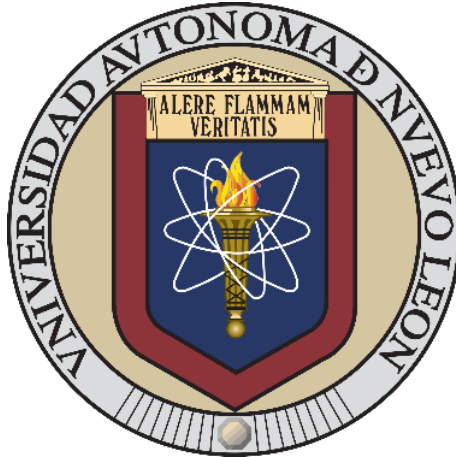


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



**ESTUDIO TRIBOLÓGICO EN ALEACIÓN DE TITANIO
BIOCOMPATIBLE MODIFICADA SUPERFICIALMENTE
MEDIANTE BORONIZADO Y TEXTURIZADO LÁSER**

POR

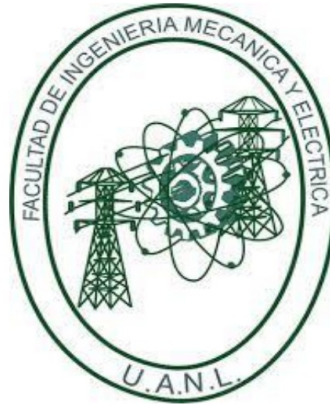
JUAN PABLO GONZÁLEZ VÁZQUEZ

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CON
ORIENTACIÓN EN MATERIALES**

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN, JULIO, 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



**ESTUDIO TRIBOLÓGICO EN ALEACIÓN DE TITANIO
BIOCOMPATIBLE MODIFICADA SUPERFICIALMENTE
MEDIANTE BORONIZADO Y TEXTURIZADO LÁSER**

POR

JUAN PABLO GONZÁLEZ VÁZQUEZ

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CON
ORIENTACIÓN EN MATERIALES**

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN, JULIO, 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Posgrado

Los miembros del Comité de Evaluación de Tesis recomendamos que la Tesis "Estudio tribológico en aleación de titanio biocompatible modificada superficialmente mediante boronizado y texturizado láser", realizada por el estudiante Juan Pablo González Vázquez, con número de matrícula 1909347, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en ciencias de la Ingeniería con especialidad en materiales.

El Comité de Evaluación de Tesis

Dr. Marco Antonio Ludovic Hernández Rodríguez
Director

Dr. Roberto Benavides Treviño
Co-director

Dr. Arturo Juárez Hernández
Revisor

Dr. Edgar Omar García Sánchez
Revisor

Dra. Karen Yaneth Pineda Arriaga
Revisor

Vo.Bo.



Dr. Azael Martínez de la Cruz
Secretario de Estudios de Posgrado

**SECRETARÍA DE
ESTUDIOS DE
POSGRADO**

Institución 190001

Programa 557546

Acta Núm. 4719

Ciudad Universitaria, a 20/07/2026

Agradecimientos

Agradezco a mi madre, padre, hermano y el resto de mi familia por su continuo apoyo incondicional, y los momentos de descanso que me otorgaron, permitiéndome seguir adelante.

Agradezco a mi novia por su agradable compañía y su paciencia en cada ocasión que me debía dedicar a mi estudio.

Agradezco a mis más cercanos amigos Hugo y Francisco por estar siempre presentes y ayudarme a distraerme en momentos de estrés.

Agradezco a mi asesor, el Dr. Marco Antonio Ludovic Hernández Rodríguez, por su constante guía, paciencia y sus enseñanzas.

Agradezco a mis maestros de la maestría por el conocimiento que me compartieron durante los cursos de este grado en esta área nueva para mí.

Agradezco a mis compañeros y amigos de la maestría por permitirme aprender con ellos y de ellos.

Agradezco a mis compañeros y amigos del laboratorio por hacer más ameno el trabajo experimental y su ayuda en algunas pruebas.

Agradezco a FIME y a la UANL por facilitarme las instalaciones necesarias para la realización de este trabajo.

Agradezco al secihti por el apoyo económico que me proporcionó y por su confianza.

Dedicatoria

A mi familia, amigos y novia,
sin quienes no habría podido llegar hasta aquí.

Tabla de contenido

Índice de tablas.....	1
Índice de figuras.....	2
Resumen.....	4
CAPÍTULO 1. Introducción.....	5
1.1. Implantes ortopédicos y la artroplastia.....	5
1.2. Biomateriales en implantes de sustitución de articulación.....	6
1.3. Aleaciones de titanio como implantes para articulaciones.....	8
1.4. Técnicas de tratamiento superficial.....	10
1.4.1. Texturizado láser.....	10
1.4.2. Boronizado en aleaciones de titanio.....	15
1.5. Texturizado láser en conjunto con boronizado.....	17
1.6. Desgaste.....	19
CAPÍTULO 2. Hipótesis y Objetivos.....	20
2.1. Hipótesis.....	20
2.2. Objetivos.....	20
2.2.1. Objetivo general.....	20
2.2.2. Objetivos específicos.....	20
CAPÍTULO 3. Metodología experimental.....	21
3.1. Tratamientos superficiales.....	22
3.1.1. Muestras texturizadas.....	22
3.1.2. Muestras boronizadas.....	25
3.1.3. Muestras texturizadas y boronizadas.....	26
3.2. Prueba de desgaste con tribómetro.....	26
3.3. Caracterización.....	26
3.3.1. Microscopía de medición.....	26
3.3.2. Prueba de dureza Vickers.....	28
3.3.3. Microscopía electrónica de Barrido (SEM).....	28
3.3.4. Microscopía óptica.....	28

CAPÍTULO 4. Resultados y discusión.....	29
4.1. Texturizado.....	29
4.2. Boronizado.....	32
4.3. Coeficiente de fricción en tribómetro.....	35
4.4. Microscopía de medición.....	38
4.5. Microdureza Vickers.....	39
4.6. Imágenes SEM de huella de desgaste.....	41
CAPÍTULO 5. Conclusiones.....	46
Recomendaciones.....	48
Referencias.....	49
Apéndices.....	52

Índice de tablas

Tabla 1. Comparación de diferentes tratamientos de boronizado con su respectiva profundidad y dureza resultantes.....	17
Tabla 2. Tratamientos realizados sobre los 6 tipos de muestra.....	21
Tabla 3. Parámetros del láser utilizados para crear el patrón en la superficie de la aleación.....	23
Tabla 4. Coeficiente de fricción promedio calculado de las 3 muestras para cada configuración de tratamientos.....	36
Tabla 5. Volumen perdido promedio después de la prueba de desgaste en tribómetro tipo ball-on-disk y el número de veces que el desgaste fue reducido con respecto a la muestra sin tratamientos.....	39
Tabla 6. Dureza medida a diferentes distancias de la superficie de la muestra boronizada.....	40

Índice de figuras

Figura 1. Diagrama que ilustra los componentes y los mecanismos de desgaste de adhesión y por fatiga superficial de una prótesis de cadera, donde a_c es la aspereza del cotilo y a_H es la aspereza de la cabeza. Recuperado de [3].....6

Figura 2. Esquema del montaje experimental de la investigación [9] para el texturizado láser, traslapando pulsos para crear geometrías..... 11

Figura 3. Ejemplos de combinaciones de patrones de texturizado y espaciado que se han evaluado sobre aleaciones de titanio: a) líneas rectas separadas 50 μm [18], b) líneas onduladas separadas 200 μm [10], c) círculos coaxiales 300 μm [9]..... 14

Figura 4. Dibujo esquemático del mecanismo de desgaste. Recuperado de [9].
..... 15

Figura 5. Micrografías SEM de: a) Área superficial del patrón de texturizado, b) sección transversal de muestra texturizada y boronizada. Recuperado de [10].....18

Figura 6. Patrones creados sobre la superficie de las muestras a) Patrón de Círculos concéntricos. Espaciado de 300/200 μm . De 2.8 mm hasta 16 mm de radio. Huella de desgaste en dirección paralela al texturizado. b) Líneas que parten del centro al exterior. Espaciado de 300/200 μm . De 1 mm hasta 15 mm de radio. Huella de desgaste en dirección perpendicular al texturizado.....24

Figura 7. Ilustración del proceso de boronizado. Se introducen las muestras de titanio a un contenedor de acero y se llena con polvo EKABOR® 2. El

contenedor se coloca dentro de una mufla a 1050° C por 5 horas.....25

Figura 8. Micrografías SEM de a) patrón impreso en muestra CT, b) acercamiento a líneas de texturizado de muestra CT, c) patrón impreso en muestra RT, d) acercamiento a líneas de texturizado de muestra RT e) patrón impreso en muestra BCT, f) acercamiento a líneas de texturizado de muestra CT g) patrón impreso en muestra BRT, h) acercamiento a líneas de texturizado de muestra CT.....32

Figura 9. Vista transversal de líneas de texturizado para las muestras a) CT b) RT c) BCT y d) BRT.....30

Figura 10. Imagen óptica de la microestructura de la muestra B tomada alejada de los bordes de la muestra, boronizada a 1050 °C por 5 h.....33

Figura 11. Imagen SEM de la sección transversal de muestra B.....34

Figura 12. Gráficas del coeficiente de fricción medido a través del tiempo para los diferentes tipos de muestra, creadas con la información arrojada por el tribómetro para las muestras a) UT b) B c) TC d) TR e) TCB f) TRB.....37

Figura 13. Gráfica de dureza al aumentar la distancia con respecto a la superficie.....41

Figura 14. Micrografías SEM de la zona afectada por el desgaste en la superficie de la muestra a) UT, c) CT, e) BCT, g) RT i) BRT y un acercamiento en el límite entre la zona no desgastada con la huella de desgaste para muestras b) UT (huella de desgaste a la derecha) d) (huella de desgaste a la

derecha), f) BCT (huella de desgaste a la izquierda), h) RT (huella de desgaste a la derecha) y j) BRT (huella de desgaste al centro).....45

Resumen

La limitada vida útil de las prótesis articulares y el carácter invasivo de las cirugías de revisión hacen necesaria la implementación de tratamientos

superficiales biocompatibles capaces de mejorar el desempeño tribológico de las aleaciones utilizadas en aplicaciones biomédicas, como Ti-6Al-4V. En el presente estudio se evaluó el efecto del texturizado superficial mediante láser y del boronizado sobre la resistencia al desgaste de esta aleación. Asimismo, se comparó el comportamiento tribológico de geometrías de texturizado orientadas de manera paralela y perpendicular a la dirección de la huella de desgaste.

Los resultados mostraron una mejora significativa en el comportamiento tribológico de las muestras tratadas, alcanzándose una reducción del volumen perdido de hasta 27 veces respecto a la aleación sin tratamiento cuando ambos procesos fueron combinados. Esta mejora se atribuye al incremento de dureza superficial inducido por la formación de boruros de titanio, así como a la capacidad de las texturas láser para favorecer la retención y distribución del lubricante y actuar como microtrampas para partículas de desgaste. En conjunto, estos efectos modificaron los mecanismos de desgaste predominantes y contribuyeron a reducir la remoción de material durante los ensayos tribológicos.

CAPÍTULO 1. Introducción

1.1. Implantes ortopédicos y la artroplastia

Los implantes ortopédicos son dispositivos médicos utilizados para reemplazar o restaurar estructuras óseas comprometidas por envejecimiento, enfermedades degenerativas o lesiones traumáticas [1]. Estos dispositivos abarcan desde sistemas temporales de fijación, como tornillos, clavos y placas óseas, hasta implantes permanentes, incluyendo reemplazos articulares totales. Sus aplicaciones se extienden a diversas regiones anatómicas, particularmente la cadera, la rodilla y la columna vertebral. De acuerdo con Abd-Elaziem y colaboradores, en 2024 más de la mitad de los implantes ortopédicos fueron fabricados a partir de materiales metálicos, aunque los materiales cerámicos y poliméricos continúan utilizándose en aplicaciones biomédicas específicas [2].

Una prótesis de cadera está compuesta generalmente por un componente femoral y una copa acetabular como se observa en la Figura 1. De acuerdo con los materiales empleados en las superficies de articulación se clasifican las prótesis de reemplazo articular; particularmente, las de cadera se clasifican comúnmente como *metal-on-metal* (MoM) o *metal-on-polyethylene* (MoP), siendo esta última la configuración más utilizada actualmente en aplicaciones clínicas [3,4]

La artroplastia corresponde al procedimiento quirúrgico mediante el cual se reemplaza parcial o totalmente una articulación dañada. Se trata de una intervención ampliamente practicada; únicamente en Estados Unidos se realizan anualmente alrededor de 300,000 artroplastias totales de cadera [4].

La preocupación asociada a la osteólisis y al aflojamiento de los implantes inducidos por el desgaste de las interfaces metal–polietileno impulsó, a finales de la década de 1990 y principios de los años 2000, un renovado interés en las prótesis metal–metal (MoM). En este tipo de sistemas, la aleación CoCrMo

fue una de las más empleadas debido a su elevada resistencia mecánica y al desgaste, además de la expectativa de proporcionar una mayor estabilidad y una menor tasa de fallo clínico [4-6].

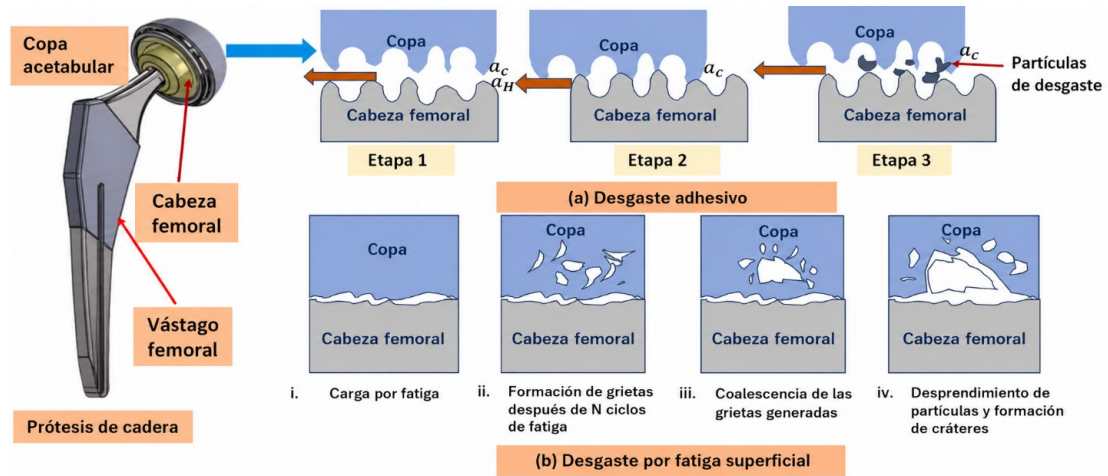


Figura 1. Diagrama que ilustra los componentes y los mecanismos de desgaste (a) por adhesión, donde se crean partículas de desgaste al adherirse las superficies durante fricción entra la copa acetubular y la cabeza femoral (b) por fatiga superficial de una prótesis de cadera, donde se van creando fracturas después de N cantidad de ciclos de carga. Recuperado de [3]. Traducido al español.

1.2. Biomateriales en implantes de sustitución de articulación

Los biomateriales destinados a aplicaciones ortopédicas deben cumplir con una serie de requisitos fundamentales para garantizar su desempeño funcional y su estabilidad a largo plazo dentro del cuerpo humano [7]. Entre las propiedades más relevantes se encuentran un comportamiento mecánico adecuado, caracterizado por una combinación de baja rigidez, elevada resistencia mecánica y alta dureza superficial [2]. Asimismo, estos materiales deben presentar una elevada biocompatibilidad, lo que implica ausencia de

toxicidad y de respuestas alérgicas o inflamatorias adversas tras su implantación en el organismo [2,3,7].

Adicionalmente, los biomateriales empleados en prótesis ortopédicas deben favorecer la osteointegración con el tejido óseo circundante. Para ello, es deseable que presenten características superficiales específicas, como un grado controlado de porosidad o modificaciones topográficas que promuevan la adhesión celular y la formación de apatita similar a la del hueso sobre la superficie del implante [2, 8]. Finalmente, una elevada resistencia a la corrosión y al desgaste resulta esencial para minimizar la liberación de iones metálicos y partículas de desgaste hacia los fluidos corporales, ya que estos fenómenos pueden desencadenar procesos inflamatorios y contribuir al aflojamiento aséptico del implante [2,9].

Los materiales utilizados en aplicaciones ortopédicas pueden clasificarse principalmente en tres grandes categorías: metales y aleaciones metálicas, polímeros y materiales cerámicos [2]. Entre ellos, los metales constituyen los biomateriales más ampliamente empleados en ortopedia [10-11], representando más de dos tercios de los implantes utilizados clínicamente. Su uso es particularmente común en aplicaciones sometidas a altas cargas mecánicas, como las prótesis de cadera y rodilla, debido a sus sobresalientes propiedades mecánicas y estructurales.

Las aleaciones metálicas ofrecen ventajas adicionales frente a los metales puros, incluyendo una mayor resistencia mecánica y una mejor resistencia a la corrosión. En consecuencia, los principales grupos de materiales metálicos biocompatibles utilizados en implantes ortopédicos incluyen los aceros inoxidables, las aleaciones de cobalto-cromo (Co–Cr) y las aleaciones de titanio.

A pesar de los avances en el desarrollo de biomateriales y diseños protésicos, la limitada vida útil de las prótesis articulares continúa representando un

desafío importante. En el caso de las prótesis de cadera, se estima una vida útil promedio de entre 10 y 15 años antes de requerir una cirugía de revisión o reemplazo [2-3]. Entre los principales factores responsables de esta limitación se encuentran los siguientes:

- *Stress Shielding* o blindaje contra el estrés: un fenómeno que ocurre cuando se implanta un material, como puede ser el vástago de una prótesis metálica, con un módulo de elasticidad mucho mayor que el del hueso circundante. En este caso, el implante, que es más rígido, soporta una porción mucho mayor de la carga del peso del cuerpo, protegiendo al hueso de la tensión mecánica habitual. Según la ley de Wolff, el hueso se adapta a las cargas mecánicas que recibe por lo que un blindaje contra el estrés lleva a la pérdida de masa ósea, lo que lleva al aflojamiento y fallo del implante [2].
- Baja osteointegración: Es la falta de integración directa y estable entre el implante y el hueso circundante. En lugar de que el hueso crezca, adhiriéndose directamente a la superficie del implante, los macrófagos y fibroblastos forman una interfaz de tejido fibroso alrededor de este, pues el cuerpo está recibiendo al implante como un material extraño, aislando al implante del hueso vivo. Esto permite pequeños movimientos indeseados de la prótesis dentro del hueso que a la larga siguen debilitando la unión entre ellos [2]. La baja osteointegración está fuertemente influenciada por las propiedades de la superficie del biomaterial: la superficie, rugosidad, topografía, químicas correctas y que sea bioactiva (promoviendo la formación de apatita) pueden mejorar las interacciones con las células humanas, y promover la adhesión celular, proliferación, diferenciación osteogénica, así como la mineralización de la matriz [1,11].
- Osteolisis: la pérdida de tejido óseo causada por residuos de desgaste y corrosión liberados de los componentes metálicos del implante (que pueden ser tanto la cabeza femoral como la copa acetabular) como

partículas metálicas e iones, las cuales desencadenan una respuesta inflamatoria en los tejidos alrededor de la prótesis, mediada por macrófagos [4,12,13]. Estas células absorben las partículas de desgaste, se activan y atraen más células inmunitarias a la región periprotésica, llenando ciertas áreas del fémur con tejido granulomatoso [12]. La osteólisis severa puede conducir a complicaciones como el aflojamiento aséptico del implante, esto a la falla del implante, y finalmente a la necesidad de cirugía de revisión [4,7].

- Aflojamiento aséptico: El fallo o la pérdida de fijación de un implante causado por la generación de partículas de desgaste, sin la presencia de una infección. Se le asocia con otras complicaciones como inflamación, la aparición de tejido fibroso y osteolisis en implantes articulares [5,12,14].

1.3. Aleaciones de titanio como implantes para articulaciones

La aleación Ti-6Al-4V es el estándar en aplicaciones biomédicas debido a sus buenas propiedades mecánicas, baja densidad, así como resistencia a la corrosión, sin embargo, presenta desventajas para el caso de los reemplazos de articulación como su baja dureza y pobre resistencia al desgaste. La alta pérdida del material debido al desgaste durante su interacción entre interfaces ha sido la principal limitación en cuanto al uso de las aleaciones de titanio en aplicaciones biomédicas, especialmente como implantes ortopédicos. La constante frotación entre las superficies en movimiento de una prótesis causa la generación de pequeñas partículas, que pueden variar en tamaño desde 10 μm de diámetro hasta el tamaño nanométrico, o presentarse como iones disueltos de los metales de la prótesis, pueden causar inflamación, citotoxicidad, alergia al metal, etc. al ser reconocidas por células inmunes que responden secretando agentes que llevan al aflojamiento aséptico y la falla del implante [13,15,16].

Para reducir este problema y extender la vida útil de este tipo de implantes, se han propuesto e investigado diversas metodologías centradas principalmente

en mejorar las propiedades tribológicas y la biocompatibilidad del material. Algunas de estas son la texturización de la superficie con láser, la oxidación anódica, nitruración, boronizado, *sand blasting* o incluso el desarrollo de aleaciones alternativas [3,17,18].

La aleación Ti-6Al-4V constituye uno de los materiales de referencia en aplicaciones biomédicas debido a su combinación de alta resistencia mecánica, baja densidad y excelente resistencia a la corrosión. No obstante, en aplicaciones de reemplazo articular presenta limitaciones importantes asociadas a su baja dureza y reducida resistencia al desgaste. La pérdida progresiva de material ocasionada por el contacto y deslizamiento entre interfaces articulares ha sido uno de los principales factores que restringen el uso de las aleaciones de titanio en implantes ortopédicos sometidos a condiciones tribológicas severas.

Durante el funcionamiento de una prótesis articular, la fricción continua entre las superficies en movimiento genera partículas de desgaste y especies metálicas disueltas que pueden variar desde tamaños micrométricos hasta nanométricos [13,15,16]. Estas partículas son reconocidas por el sistema inmunológico, desencadenando respuestas inflamatorias asociadas con citotoxicidad, hipersensibilidad a metales y liberación de mediadores biológicos que favorecen la osteólisis, el aflojamiento aséptico y, eventualmente, la falla del implante.

Con el objetivo de reducir estos efectos y prolongar la vida útil de los implantes ortopédicos, se han propuesto diversas estrategias orientadas principalmente al mejoramiento de las propiedades tribológicas y de la biocompatibilidad superficial de las aleaciones de titanio. Entre las metodologías más estudiadas se encuentran el texturizado superficial mediante láser, la oxidación anódica, la nitruración, el boronizado, el *sandblasting* y el desarrollo de nuevas

composiciones de aleaciones con propiedades mecánicas y tribológicas optimizadas [3,17,18].

1.4. Técnicas de tratamiento superficial

1.4.1. Texturizado láser

El texturizado superficial mediante láser (Laser Surface Texturing, LST) constituye una técnica de modificación topográfica ampliamente investigada y aplicada en diversos campos de la ingeniería, debido a su capacidad para mejorar propiedades superficiales como la mojabilidad, la adhesión de recubrimientos, la reducción de fricción y la transferencia térmica. Esta técnica, ilustrada en la Figura 2, emplea un haz láser de alta densidad de energía para generar estructuras micro y nanométricas sobre la superficie de los materiales.

En el caso de materiales metálicos, es común utilizar láseres pulsados con anchos de pulso del orden de nanosegundos, los cuales inducen fenómenos de fusión y solidificación rápida y localizada en regiones específicas de la superficie. La superposición controlada de estos pulsos permite la formación de líneas y canales texturizados mediante la acumulación sucesiva de puntos irradiados. A escala macroscópica, estos elementos pueden organizarse en diferentes configuraciones geométricas, incluyendo arreglos de puntos espaciados, patrones hexagonales, ondulaciones, círculos y surcos lineales, entre otros [9,18,19].

Además de sus beneficios tribológicos, el texturizado superficial mediante láser ha mostrado ventajas importantes en el campo de los biomateriales. Entre ellas destaca la mejora en la fijación del implante con el tejido óseo circundante. Por ejemplo, Melo-Fonseca et al. [1] reportaron que la combinación de texturizado láser con un tratamiento hidrotérmico de biofuncionalización permitió la formación de una capa de óxido bioactiva e hidrofílica sobre una aleación Ti-6Al-4V, favoreciendo potencialmente la osteointegración del implante.

El texturizado láser ha sido comparado con otras técnicas de modificación superficial utilizadas en aplicaciones biomédicas, tales como el granallado, la oxidación anódica y la deposición química de vapor. Aunque algunos de estos métodos presentan ventajas asociadas a su simplicidad y rapidez, el texturizado láser ofrece características distintivas, entre ellas una mayor precisión y repetibilidad, un control más exacto de la geometría superficial y una elevada flexibilidad en el diseño de patrones complejos. Asimismo, se trata de un proceso limpio, rápido y sin contacto directo con la superficie del material, lo que ha favorecido su adopción en múltiples estudios relacionados con biocompatibilidad y tribología [1, 20].

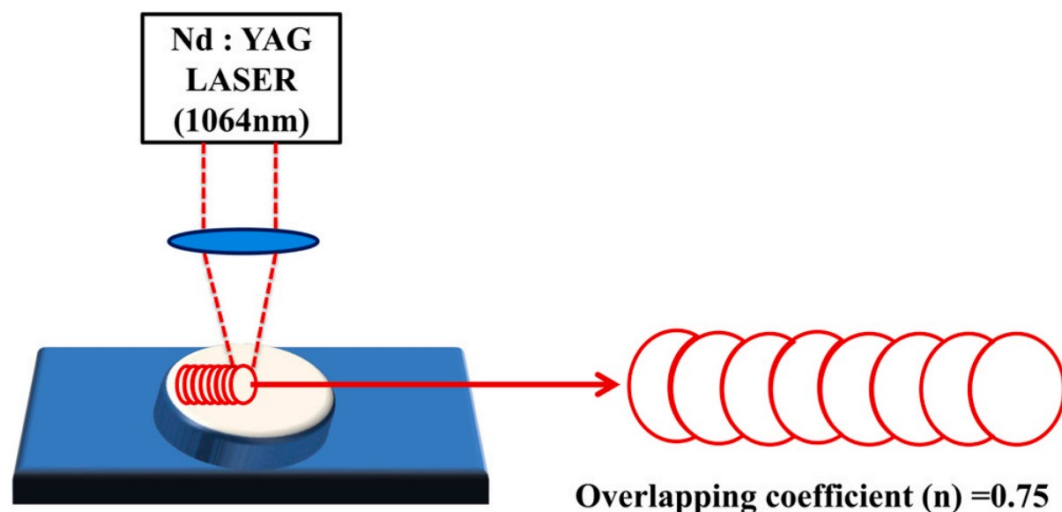


Figura 2. Esquema del montaje experimental de la investigación [9] para el texturizado láser, traslapando pulsos para crear geometrías.

Diversas investigaciones han propuesto el uso del texturizado láser como estrategia para incrementar la resistencia al desgaste de implantes biomédicos. Shabir y Dutt Sharma [9], por ejemplo, estudiaron el comportamiento tribológico de una aleación Ti-3Al-2.5V sometida a microtexturizado superficial mediante láser Nd:YAG. Los autores reportaron un incremento en la dureza superficial, acompañado de una disminución tanto del

coeficiente de fricción como de la tasa de desgaste en comparación con muestras sin tratamiento. Asimismo, señalaron que una menor separación entre texturas favorece la mejora de las propiedades tribológicas. Los ensayos de desgaste fueron realizados de acuerdo con la norma ASTM G133-05 utilizando un tribómetro tipo ball-on-disk, una bola de nitruro de silicio de 10 mm de diámetro, una carga aplicada de 15 N y un tiempo de deslizamiento de 900 s a una frecuencia de 1 Hz. Entre las diferentes geometrías evaluadas, un patrón de círculos coaxiales espaciados 305 μm produjo los mejores resultados, alcanzando una reducción del desgaste de 61.81 % y una disminución del coeficiente de fricción de 33.62 %.

Por otro lado, LinXiang et al. [19] investigaron el comportamiento de la aleación Ti-6Al-4V sometida a texturizado láser mediante pulsos ultracortos del orden de los picosegundos. Utilizando un láser con longitud de onda de 343 nm y pulsos de 268 fs, los autores generaron diferentes patrones superficiales, incluyendo geometrías tipo escama, estructuras hexagonales y superficies onduladas. Los resultados mostraron la obtención de superficies relativamente lisas y con daño térmico mínimo, evidenciando las ventajas del empleo de pulsos ultracortos para la fabricación de texturas superficiales de alta precisión. Para cuantificar el cambio en el desgaste, los autores emplearon la siguiente ecuación:

$$\text{Cambio en el desgaste} = 1 - \frac{\text{mg perdidos muestra}}{\text{mg perdidos referencia}} \quad (1)$$

Así se encontró que un espaciado menor entre texturas, sumado a la estructura de ondulaciones en la superficie, significaron un menor desgaste en comparación con las demás configuraciones, de hasta un 73% menos para una textura de una serie de líneas onduladas espaciadas 200 μm comparada con una superficie sin texturizar. Para esto, la prueba de desgaste se llevó a cabo en seco, con bolas de cerámica de zirconia con un radio de 6 mm, en

una máquina de pruebas de fricción y desgaste multifuncional UMT de Bruker, con una carga de 5 N, un radio de rotación 2.5 mm, a una velocidad de 100 rpm por 600 s. También se listaron un par de factores que aumentaron la dureza de la superficie, contribuyendo a la mejora en la resistencia al desgaste: oxidación de la superficie y reducción del tamaño de grano. Otro objeto de estudio notable es el ángulo del patrón de la superficie con respecto a la huella de desgaste en una prueba tribológica, donde resultados mucho mejores han sido observados para direcciones perpendiculares

Se realizó otro estudio acerca del desgaste sobre la misma aleación de titanio al aplicarle texturizado superficial utilizando un láser de pulsos de granate de itrio y aluminio dopado con impurezas de neodimio (Nd: YLF), con lo que se redujo el desgaste en pruebas de tribocorrosión hasta un 67.2% [18]. En este caso los pulsos fueron de 100 ns y el láser tenía una longitud de onda de 527 nm. Las pruebas de desgaste ocurrieron en fluido corporal simulado, en un tribómetro de desgaste por frotamiento, con una bola de zirconia de 6 mm de diámetro con varias cargas, de 2 N, 5 N y 10 N, a lo largo de 1 mm con una frecuencia de 5 Hz por 1800 s. Los mejores resultados se dieron para las líneas de texturizado con un traslapamiento entre ellas del 50%, la cual se puede apreciar en la Figura 3 a), con lo que se asocia el incremento del coeficiente de fricción en la prueba *ball-on-disk* para mayores separaciones debido a la diferencia de dureza entre las regiones que recibieron el tratamiento al ser comparadas con las que no habían sido texturizadas.

En cuanto a los parámetros de las texturas de los láseres a tomar en cuenta para llevar a cabo el tratamiento sobre titanio con el fin de mejorar su respuesta tribológica se encuentran:

- Duración de los pulsos: Una menor duración del pulso resulta en un mayor pico en la potencia. Disminuir la duración a la escala de los picosegundos reduce el daño térmico y la cantidad de partículas salpicadas por la

fundición [19]. Sin embargo, se obtienen resultados similares en la reducción del desgaste usando láseres convencionales, con el rango de los pulsos en los nanosegundos [18].

- Longitud de onda: Relacionado con el material del medio del láser. Se puede tener problemas de compatibilidad de ciertas longitudes con el material cuando se trata de tener un efecto térmico suficiente pero no excesivo. Esta característica también tiene un impacto en qué tan pequeño puede ser el haz. Se han reportado tratamientos de texturizado superficial en aleaciones de titanio con láseres de longitudes de onda de 1064 nm (Láser de Nd:YAG) [1,9], 343 nm (Láser de femtosegundos CARBIDE) [19], 527 nm (Láser de YLF láser) [18] y 355 nm (láser de Nd:YVO) [21].
- Velocidad de barrido del láser: Una menor velocidad de barrido significa que un área dada va a recibir una mayor energía del láser. Se suelen realizar estudios sobre titanio con 25 mm/s [18, 21] y 100 mm/s [1,9,19]. Según se prefiera, se pueden elegir velocidades menores para obtener mayor superposición entre pulsos sucesivos.
- Geometría del patrón de texturizado: Tiene un impacto en la forma en la que se almacena el lubricante en los huecos que forman el patrón de texturizado. Algunos de los patrones que se han puesto a prueba en aleaciones de titanio con forma de círculos coaxiales [9], de escamas, líneas onduladas, hexagonales [19] y líneas rectas [18].
- Espaciado entre líneas del texturizado: Los espaciados menores de sus respectivos estudios presentaron la reducción mayor en el desgaste, 305 μm para círculos coaxiales [9] y 200 μm para el patrón hexagonal [19]. Un espaciado muy grande entre marcas en un proceso de texturizado láser se relaciona con un aumento en el coeficiente de fricción [22] lo que se atribuye a que no es posible atrapar las partículas liberadas por el desgaste a tiempo, provocando un aumento en el daño sobre la superficie del material. Este parámetro se puede reducir al punto del traslapamiento de

las líneas de texturizado [18], lo que resulta en un coeficiente de fricción menor al dejar una única región de óxidos de titanio, que además es más dura que la superficie de la aleación inicial.

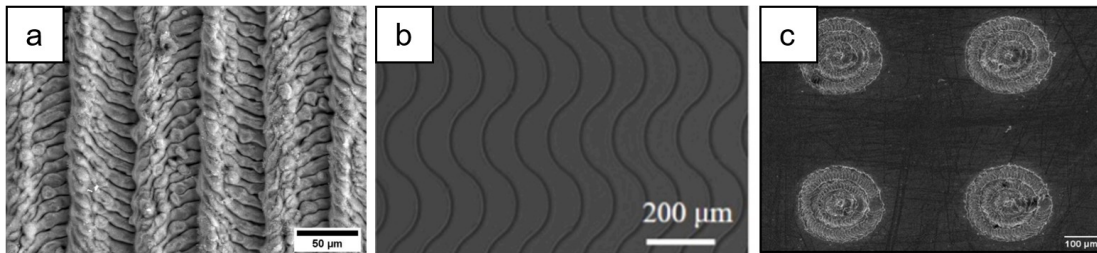


Figura 3. Ejemplos de combinaciones de patrones de texturizado y espaciado que se han evaluado sobre aleaciones de titanio: a) líneas rectas separadas 50 μm [18], b) líneas onduladas separadas 200 μm [10], c) círculos coaxiales 300 μm [9].

En general, con el tratamiento de texturizado superficial con láser se producen diversos efectos que causan aumentar la resistencia del material al desgaste. Primero, con el calor producido por efecto del láser, ocurre recristalización causando una disminución en el tamaño de grano, lo que dificulta la deformación plástica, así como se producen óxidos de titanio TiO_2 y Ti_2O_3 en la superficie [18], los cuales tienen una mayor dureza comparados al material original. Por otro lado, los huecos creados en el texturizado actúan como depósitos de lubricante, además de tomar el papel de una micro-trampa para fragmentos liberados una vez iniciado el desgaste sobre la superficie [9]. Esto último se ve representado en la Figura 4. También ocurre una reducción del área de contacto efectiva en la interfaz entre superficies, lo que reduce contactos entre asperezas comparado a el desgaste de materiales sin texturizar [9]. El LST puede llevar al refinamiento de grano durante la

refundición y solidificación del metal en la región cercana a la superficie lo que también aumenta la dureza y reduce el desgaste.

1.4.2. Boronizado en aleaciones de titanio

Por otro lado, el boronizado, es un tratamiento conocido por mejorar la dureza, resistencia al desgaste y a la corrosión de materiales metálicos. Siendo utilizado comúnmente en aceros, aleaciones de níquel, titanio y cobalto para extender la vida útil de componentes hechos de estos materiales.

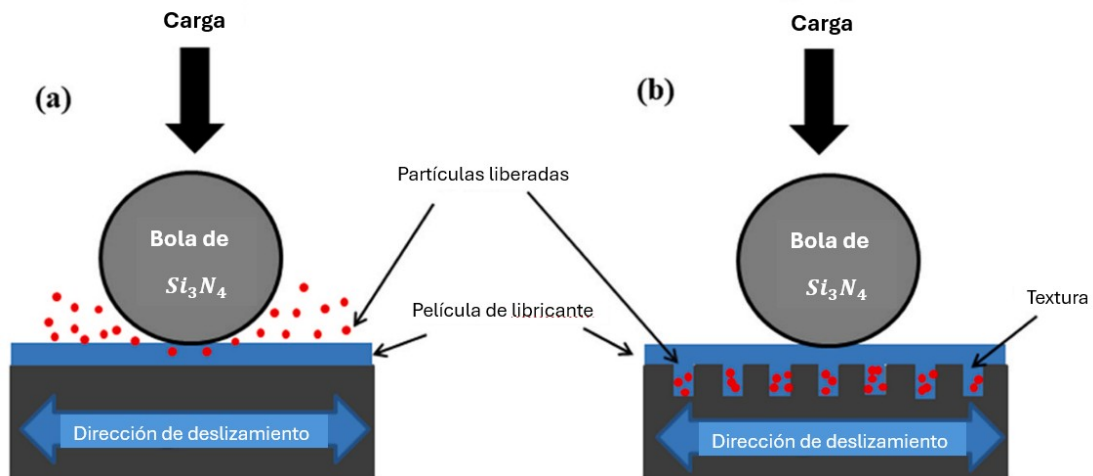


Figura 4. Dibujo esquemático del mecanismo de desgaste. Recuperado de [9].

Una manera simple y efectiva de llevar a cabo el tratamiento de boronizado es mediante empaquetamiento. El boronizado por empaquetamiento (también conocido como *pack cementation* o *pack boriding*) es un método para modificar la superficie de materiales metálicos, como el titanio y sus aleaciones, o aleaciones de cobalto que implica la difusión de átomos pequeños de boro en estado elemental hacia la superficie metálica. El proceso implica colocar las muestras metálicas en un recipiente que puede ser de acero inoxidable o alúmina, por ejemplo, para luego cubrirlas completamente con polvo

boronizante además de llenar el contenedor. Esta mezcla de polvo generalmente contiene una fuente de boro, un activador (como Na_2CO_3 , KBF_4 , KCl o compuestos que contienen fluoruros), y a veces un agente diluyente, relleno o reductor (como carbón activado, SiC , Al o Si). El recipiente luego se sella para evitar la oxidación durante el tratamiento térmico que le sigue, donde se alcanzan altas temperaturas, generalmente entre los rangos de 950°C y 1100°C , habiendo sido probados tiempos de tratamientos que van desde 1 hasta 30 horas cuando se trata de aplicar el boronizado en aleaciones de titanio. Finalmente se retira las muestras del horno y se dejan enfriar a temperatura ambiente [10, 15, 17, 23].

En general, lo que se busca lograr es la formación de una capa de boruros de alta dureza en la superficie del material, mucho mayor que la del material base [10, 15], también disminuyendo, a veces, el coeficiente de fricción en pruebas de deslizamiento [17]. Para este procedimiento se relaciona al aumento de dureza y mejor desempeño en desgaste de aleaciones de titanio con la lisura de la superficie, así como el espesor de la capa de TiB y TiB_2 formadas según el tiempo y la temperatura con la que se lleva a cabo. Varios ejemplos de la profundidad alcanzado por el boronizado y durezas esperables como resultado de este tipo de tratamientos se presentan en la Tabla 1.

También se indica que la liberación de partículas para la superficie boronizada a 1050°C en ambiente de fluido corporal simulado podría ser menos perjudicial para el cuerpo humano, al estudiar su composición y compararla con la de las partículas liberadas al desgastar el titanio puro [15]. Mientras que el primero consiste principalmente en Ca , P y O , elementos biocompatibles y bioactivos incluso durante el deslizamiento, para el segundo se encuentran partículas de Ti , O y Al , potencialmente pro-inflamatorias y bio-inertes.

Tabla 1. Comparación de diferentes tratamientos de boronizado con su respectiva profundidad y dureza resultantes.

Material	Método	Profundidad de boronizado/ concentración	Dureza	Ref.
Ti-6Al-4V	Empaquetamiento, entre 950° a 1100° por entre 5 y 30 h	8 – 28 μm	24 y 19 GPa para las fases de TiB_2 y TiB respectivamente	[23]
Ti-6Al-4V	Empaquetamiento a 1100° por 2.5 h	10 μm	2000 HV	[17]
Ti puro	Empaquetamiento a 950° y 1050° C	3.4 – 8-9 μm	1032 – 1291 HV	[15]
Ti-6Al-4V	Revestimiento por láser	5 - 35 wt%	61.9 HRC	[24]
Ti puro	Impregnación por sal disuelta a 950° a 1150° C	2.6– 30 μm	300 -2400 HV	[25]

1.5. Texturizado láser en conjunto con boronizado

Un estudio con objetivos similares, orientado a la reducción del desgaste y del coeficiente de fricción mediante la combinación de texturizado superficial y boronizado, fue realizado por Hernandez-Rodriguez et al. [10] sobre la aleación de cobalto ASTM F-1537 empleada en aplicaciones protésicas. Además de evaluar el comportamiento tribológico del material, los autores analizaron la influencia de la corrosión sobre los mecanismos de desgaste.

Para el tratamiento de texturizado superficial se seleccionó un patrón periódico de puntos, ilustrado en la Figura 5 (a), caracterizado por cavidades con una profundidad aproximada de 220 μm y un diámetro cercano a 100 μm , como se muestra en la Figura 5 (b). La generación de estas geometrías requirió una potencia láser de 24 W, una frecuencia de 210 Hz y tres repeticiones del proceso de irradiación.

En cuanto al tratamiento termoquímico, el boronizado se llevó a cabo a 950 °C durante 6 h, condiciones seleccionadas con el propósito de obtener capas de boruros uniformes y continuas sobre la superficie de la aleación.

Las pruebas de desgaste se realizaron en un tribómetro tipo *ball-on-disk*, recorriendo la bola una distancia de 3166 m a una frecuencia de 3.5 Hz. Se indicó que la corrosión tuvo un mayor efecto sobre la pérdida de material después de aplicarle la difusión termoquímica de boro, sin embargo, el desgaste siguió siendo menor en las muestras texturizadas y boronizadas incluso comparadas con las que sólo fueron tratadas con texturizado.

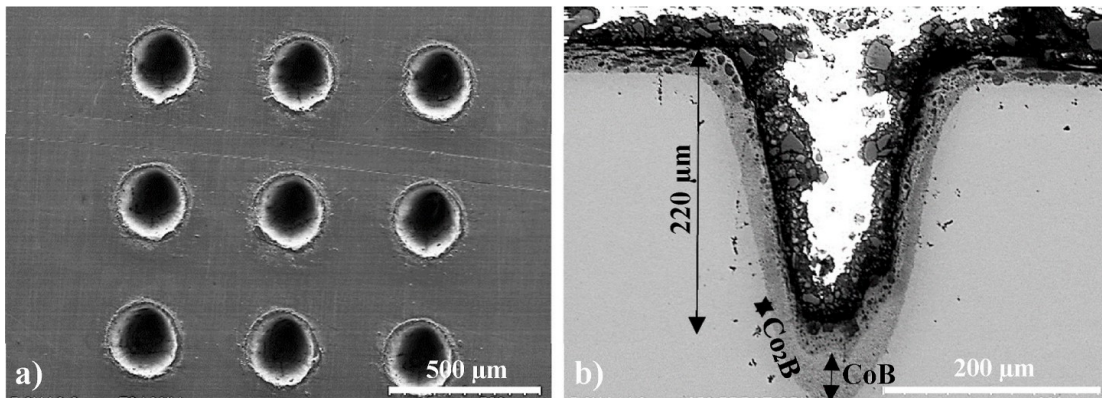


Figura 5. Micrografías SEM de: (a) Área superficial del patrón de texturizado, (b) sección transversal de muestra texturizada y boronizada. Recuperado de [10].

1.6. Desgaste

Diferentes tipos de desgaste se manifiestan tanto a través de diversos daños característicos en la superficie como de la generación de residuos con propiedades variables. Estos mecanismos de desgaste afectan la longevidad y el rendimiento de los implantes, ya que la pérdida de material y la liberación de residuos pueden provocar respuestas biológicas adversas, eventualmente llevando al fallo del implante [11]. Los mecanismos más relevantes para el desgaste que sufren las prótesis ortopédicas son:

- Desgaste adhesivo: Ocurre cuando un material se adhiere a la superficie metálica y luego se desprende. Puede manifestarse en forma de surcos de poca profundidad, pequeñas picaduras y microfisuras [26].
- Desgaste abrasivo: Se describe generalmente como un daño en la superficie sólida donde un material duro y afilado entra en contacto con un material más blando, raspando la superficie más blanda para formar residuos de desgaste [3]. Se puede clasificar en:
 - Abrasión de dos cuerpos: Las irregularidades de la superficie más dura se incrustan sobre el material más blando, produciendo partículas de desgaste, lo que se manifiestan como surcos en la superficie.
 - Abrasión de tres cuerpos: Tiene lugar cuando partículas duras ajenas a las superficies en contacto quedan atrapadas entre ellas, se incrustan en la más blanda y funcionan como elementos abrasivos del material más duro, desprendiendo material de ambas superficies. Las marcas de desgaste se muestran como surcos profundos, picos afilados, arañazos graves en el fondo y desgaste irregular.
- Desgaste por fatiga: La repetición de deformaciones en la superficie causan un eventual desprendimiento de secciones del material. Se puede mostrar en forma de *spalling* o “desconchado” [26].

- Tribocorrosión: Es la degradación que ocurre por la combinación de desgaste y corrosión electroquímica, esta última causada por el ambiente al interior del cuerpo, como los iones presentes en fluidos corporales o el oxígeno [18].

CAPÍTULO 2. Hipótesis y Objetivos

2.1. Hipótesis

La aleación de titanio ASTM grado 5 reducirá considerablemente su desgaste en una prueba tribológica tipo ball-on-disk, al aplicarle los tratamientos superficiales de texturizado láser y boronizado.

2.2. Objetivos

2.2.1. Objetivo general

Evaluar el comportamiento tribológico de la aleación Ti-6Al-4V después de la aplicación de los tratamientos combinados de texturizado superficial con láser y boronizado por empaquetamiento.

2.2.2. Objetivos específicos

- Crear una capa uniforme de boruros de titanio, caracterizada mediante una prueba de dureza Vickers, microscopia óptica y SEM en su sección transversal.
- Cubrir la superficie boronizada del material con patrones de texturizado láser radiales y circulares formado por líneas de texturizado de similar profundidad.
- Analizar el comportamiento tribológico de las superficies creadas en un tribómetro tipo *ball-on-disk*.
- Evaluar el desgaste de la aleación de titanio midiendo la pérdida de volumen mediante microscopía de medición y observando las huellas mediante microscopía electrónica.
- Comparar el desgaste de las muestras de texturizado radial con las de texturizado circular.

CAPÍTULO 3. Metodología experimental

Se empleó una barra de titanio de la aleación Ti-6Al-4V como material base para el presente estudio. Previo a la aplicación de los tratamientos superficiales y la caracterización, la barra de titanio fue seccionada en muestras cilíndricas de 7 mm de altura y 19 mm de diámetro. Posteriormente,

las superficies destinadas a los tratamientos fueron preparadas mediante desbaste mecánico hasta alcanzar un acabado superficial correspondiente a papel abrasivo de grano 1200.

La Tabla 2 resume los tratamientos superficiales aplicados a las muestras evaluadas en el tribómetro, junto con la nomenclatura empleada para cada condición experimental.

Tabla 2. Tratamientos realizados sobre los 6 tipos de muestra.

Muestra	Tratamientos	Nomeclatura en inglés
UT	Sin tratamiento.	Untreated.
CT	Texturizado láser de círculos concéntricos.	Circular laser textured.
RT	Texturizado láser radial.	Radial laser textured.
B	Boronizado a 1050° C	Borided.
BCT	Texturizado láser de círculos concéntricos boronizado a 1050°.	Borided circular textured.
BRT	Texturizado láser radial boronizado a 1050°.	Borided radial textured.

3.1. Tratamientos superficiales

3.1.1. Muestras texturizadas

El texturizado superficial se realizó utilizando un láser pulsado Nd:YAG SIDECO SIF-M2030, con una potencia máxima de 30 W y una longitud de onda de 1064 nm. Con los parámetros mostrados en la Tabla 3, y aplicando los patrones de texturizado mostrados en la Figura 6 que fueron diseñados e importados al software EzCad 2, se efectuó el grabado sobre la superficie de las muestras de Ti-6Al-4V.

Con el propósito de evaluar la influencia de la geometría superficial sobre el volumen perdido y el coeficiente de fricción durante los ensayos tribológicos, se diseñaron dos configuraciones de texturizado distintas:

- Patrón de círculos concéntricos

Se grabaron círculos concéntricos sobre la superficie de las muestras, haciendo coincidir el centro geométrico del patrón con el centro de cada muestra. La separación radial entre círculos consecutivos fue de 200 μm para las muestras CT y de 300 μm para las muestras BCT, cubriendo completamente la región potencial de formación de la huella de desgaste. Los diámetros de los círculos se incrementaron desde 2.8 mm hasta 16 mm. La geometría del patrón se muestra en la Figura 6 (a). Bajo las condiciones del ensayo tribológico, la dirección de deslizamiento coincidió con la orientación del texturizado.

- Patrón radial

El patrón radial consistió en líneas orientadas perpendicularmente a circunferencias de radio progresivamente creciente, comprendidas entre 1 y Cada línea presentó una longitud de 1 mm. Para mantener una separación aproximada de 200 μm en las muestras CT y de 300 μm en las muestras BCT,

se ajustó el número de líneas distribuidas alrededor de cada circunferencia en función de su radio, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$líneas = \frac{\pi (diámetro)}{100 \mu m} \quad (2)$$

La geometría correspondiente a este patrón de texturizado se presenta en la Figura 6 (c). Durante los ensayos tribológicos, la trayectoria de la huella de desgaste se orientó perpendicularmente a las líneas de texturizado.

Para las muestras no boronizadas se seleccionaron menores velocidades de escaneo, mayor espaciamiento entre líneas y un mayor número de ciclos de irradiación. Estos parámetros fueron necesarios debido a que las superficies sin boronizar mostraron una menor interacción con el haz láser, produciendo una modificación superficial menos pronunciada y, en consecuencia, canales de textura más estrechos en comparación con aquellos obtenidos en las muestras boronizadas bajo condiciones de menor aporte térmico.

Tabla 3. Parámetros del láser utilizados para crear el patrón en la superficie de la aleación.

Parámetro	Valor	
	Sin boronizar	Boronizadas
Velocidad de barrido (mm/s)	20	50
Potencia (%)	80	80
Frecuencia (kHz)	100	100
Ancho del pulso (ns)	100	100
Espaciado entre líneas (μm)	300	200
Repeticiones de ciclos	8	2

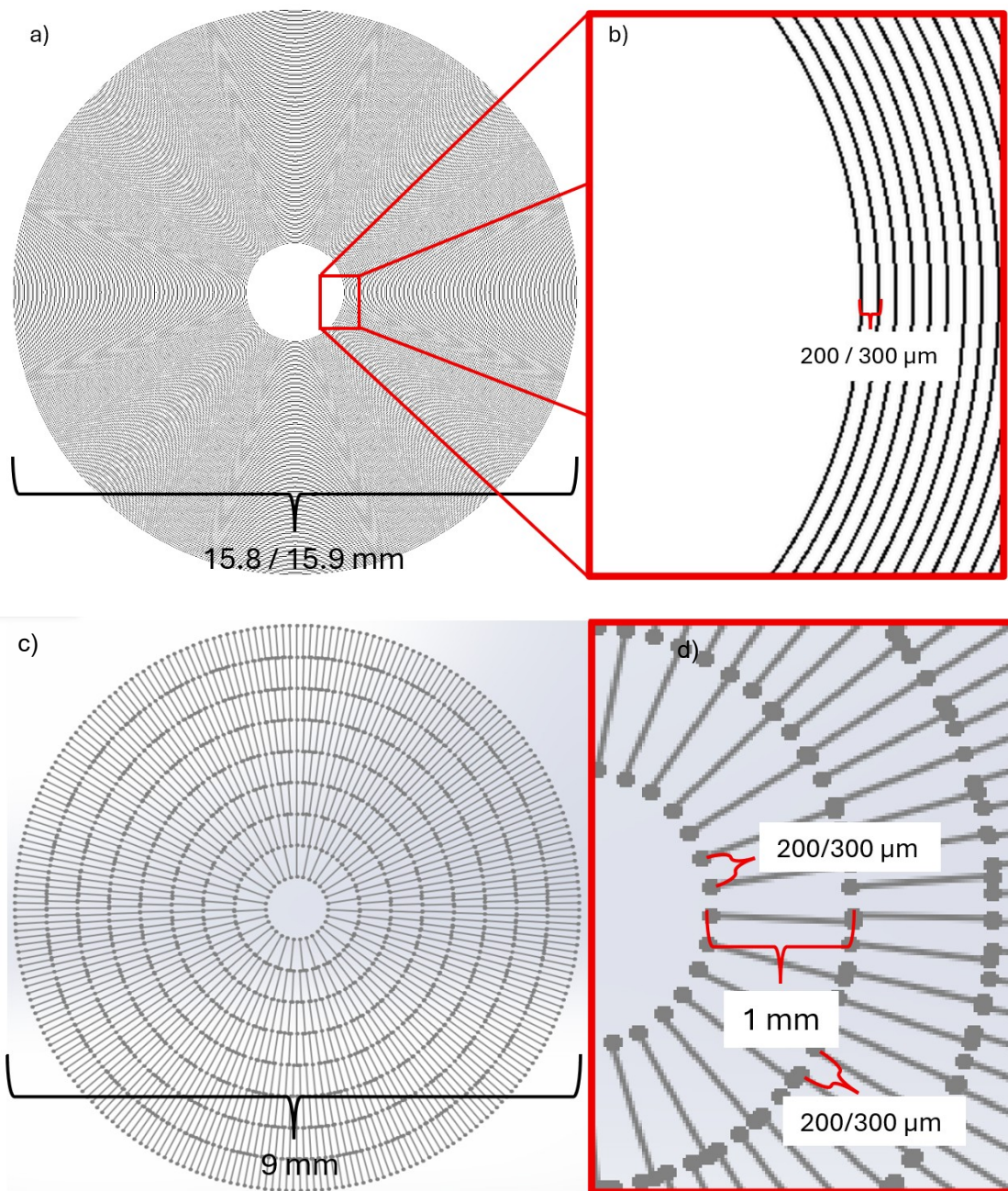


Figura 6. Patrones creados sobre la superficie de las muestras (a) Patrón de Círculos concéntricos diseñado en LibreCAD. Espaciado de 300/200 μm entre

círculos. De un máximo de 15.8/15.9 de diámetro para la muestra sin boronizado/boronizada. Huella de desgaste en dirección paralela al texturizado. (b) Acercamiento a textura circular. (c) Patrón radial diseñado en software SOLIDWORKS 2025. Líneas que parten del centro al exterior. Espaciado de 300/200 μm . De 1 mm hasta 18 mm de diámetro. Huella de desgaste en dirección perpendicular al texturizado. (d) Acercamiento a textura radial.

3.1.2. Muestras boronizadas

El procedimiento de boronizado se esquematiza en la Figura 7. Las muestras de Ti-6Al-4V fueron colocadas dentro de un contenedor de acero y completamente rodeadas con polvo boronizante EKABOR® 2, asegurando el llenado total del volumen interno. Posteriormente, el polvo fue compactado manualmente para favorecer el contacto superficial entre el medio boronizante y la superficie de las muestras.

El contenedor fue sellado utilizando fibra de vidrio y posteriormente introducido en una mufla FELISA FE-340. El tratamiento de boronizado se llevó a cabo a 1050 °C durante 5 h. Una vez finalizado el ciclo térmico, el horno se dejó enfriar de manera natural hasta alcanzar temperatura ambiente.

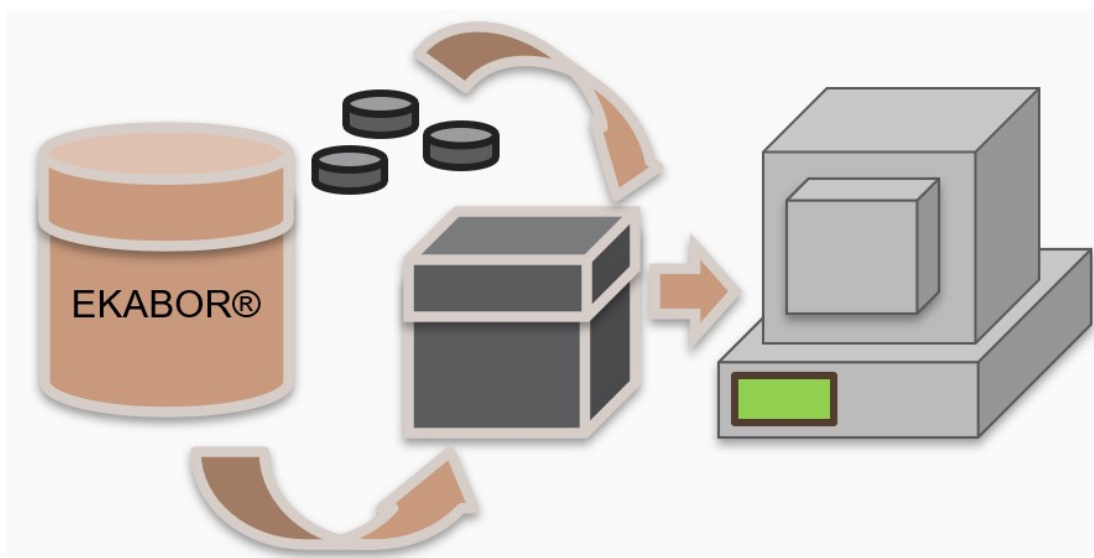


Figura 7. Ilustración del proceso de boronizado. Se introducen las muestras de titanio a un contenedor de acero y se llena con polvo EKABOR® 2. El contenedor se coloca dentro de una mufla a 1050° C por 5 horas.

3.1.3. Muestras texturizadas y boronizadas

Las muestras fueron sometidas al proceso de empaquetamiento, calentamiento y enfriamiento correspondiente al tratamiento de boronizado. Posteriormente, las superficies fueron ligeramente desbastadas mediante lijado con papel abrasivo de grano 1200 con el fin de remover residuos remanentes del polvo boronizante EKABOR® 2. Finalmente, las muestras fueron texturizadas utilizando los parámetros descritos en la Sección 6.1.1.

3.2. Prueba de desgaste con tribómetro

Los ensayos tribológicos se llevaron a cabo utilizando un tribómetro stt-1 (*specialized tailored tribometer*) tipo *ball-on-disk* fabricado en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL). Cada condición experimental fue evaluada mediante tres repeticiones independientes con el fin de garantizar la reproducibilidad de los resultados.

El volumen perdido y el coeficiente de fricción promedio fueron determinados a partir de pruebas de desgaste realizadas conforme a la norma ASTM G99. Los experimentos se efectuaron sobre muestras de Ti-6Al-4V utilizando bolas de alúmina como contracuerpo, solución salina al 0.9% de NaCl como lubricante y una carga normal de 29.4 N. Los ensayos se realizaron durante 120 min a una velocidad de rotación de 210 rpm, alcanzando una distancia total de deslizamiento de 721 m.

3.3. Caracterización

Después de los ensayos de desgaste, las muestras fueron sometidas a limpieza ultrasónica en alcohol etílico durante 10 min con el fin de remover residuos y partículas generadas durante la prueba tribológica, previo a su evaluación mediante las diferentes técnicas de caracterización.

3.3.1. Microscopía de medición

El ancho y la profundidad de las huellas de desgaste fueron medidos utilizando un microscopio óptico de medición (Nikon MM-400) acoplado a un sistema digital de lectura para tres ejes (Quadra-Chek 200). Mediante el enfoque del objetivo de 50× a diferentes alturas y posiciones a lo largo de las huellas de desgaste y de las líneas de texturizado, se obtuvo una aproximación bidimensional de sus perfiles transversales.

Para la obtención de los perfiles, inicialmente se enfocó la región de mayor altura ubicada en el borde de inicio de la huella de desgaste. Posteriormente, se registraron mediciones de profundidad desplazando el microscopio en incrementos de 0.7 mm a lo largo del eje positivo en x. Los valores registrados por el equipo permitieron determinar el ancho y la profundidad de las huellas de desgaste, así como reconstruir su perfil transversal.

Para compensar la ligera inclinación de las muestras se normalizaron los puntos que conforman la huella, asumiendo que la superficie es

completamente plana, por lo que se calcularon las nuevas coordenadas en z con la fórmula

$$z_j = z_i - \frac{z_f}{x_f} x_i \quad (3)$$

Donde z_i representa las profundidades medidas originales, z_f es la altura final, x_f , es la posición final en x, y x_i son las distancias en x medidas a partir del inicio de la huella.

Para encontrar el sólido de revolución es necesario medir las distancias en x a partir del centro de la huella por lo que se tiene

$$x_j = x_i + r_i \quad (4)$$

Donde x_j representa las distancias del centro de la huella hasta el punto elegido para ser medido y r_i es el radio interior de la huella de desgaste.

Se calculó el área de la huella y el sólido de revolución que representa el volumen de desgaste para cada muestra con un código en Python que utiliza el método de capas cilíndricas. Este código se adjunta en el Apéndice A1.

Se repitió el cálculo 3 veces por huella, rotando la muestra en diferentes direcciones y se promediaron los sólidos de revolución.

Para determinar el ancho y la profundidad de los canales que conforman los patrones de texturizado superficial, se reconstruyeron perfiles transversales enfocando el microscopio de medición en 11 puntos distribuidos a lo largo de cada canal texturizado.

3.3.2. Prueba de dureza Vickers

Las mediciones de microdureza se realizaron sobre muestras previamente preparadas con acabado espejo utilizando un microdurómetro HMV SHIMADZU. Para las evaluaciones en sección transversal se aplicó una carga de 0.98 N con un tiempo de permanencia de 15 s.

En las muestras boronizadas se obtuvo un perfil de microdureza en función de la distancia desde la superficie de la muestra, realizando cinco indentaciones separadas entre sí por intervalos de 0.12 mm.

3.3.3. Microscopía electrónica de Barrido (SEM)

Las muestras fueron analizadas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) utilizando un microscopio Hitachi SU8020. Se adquirieron imágenes de la superficie de las muestras texturizadas con el fin de caracterizar las geometrías microtexturizadas generadas por el tratamiento láser, además de que todas las muestras sometidas a tratamientos superficiales fueron examinadas para evaluar las huellas de desgaste producidas durante los ensayos tribológicos. Adicionalmente, se realizaron observaciones en la sección transversal de las muestras boronizadas para determinar la profundidad y morfología de las capas de boruros de titanio. Todas las observaciones por SEM se llevaron a cabo utilizando un voltaje de aceleración de 10 kV y una corriente de haz de 5 μ A.

3.3.4. Microscopía óptica

Se analizaron la superficie de una muestra sin tratamiento y una muestra boronizada. Estas fueron pulidas mediante lijado con papel esmeril grado 4000 y atacadas químicamente utilizando una solución de 1 ml de HF, 2 ml de HNO₃ y 100 ml de agua para revelar la microestructura de la aleación antes y después del tratamiento de boronado. Posteriormente, se tomaron imágenes ópticas para comparar la microestructura de ambas muestras.

CAPÍTULO 4. Resultados y discusión

4.1. Texturizado

La Figura 8 presenta los perfiles transversales de las líneas de texturizado obtenidas para las diferentes condiciones. La muestra CT exhibió una profundidad promedio de 27 μm y un ancho de 49 μm , mientras que la muestra BCT alcanzó una profundidad de 35 μm y un ancho de 57 μm . En ambos casos, las geometrías mostraron una morfología característica en forma de “V”, con paredes más inclinadas hacia el centro del canal texturizado. Estas diferencias se atribuyen a la mayor interacción del haz láser con la superficie boronizada de Ti-6Al-4V, lo que permitió alcanzar mayores profundidades y anchos utilizando únicamente dos ciclos de irradiación, en comparación con los ocho ciclos requeridos para las muestras no boronizadas.

La Figura 9 (a) y (c) muestra la vista superior de las muestras CT y RT, respectivamente. En la Figura 9 (b) y (d) puede observarse el espaciamiento de 300 μm entre los círculos concéntricos y entre las líneas radiales que conforman los patrones texturizados sobre las muestras no boronizadas. En contraste, la Figura 9 (f) y (h) muestran una separación de 200 μm entre las líneas de texturizado impresas sobre las muestras BCT y BRT.

Durante el procesamiento láser se observó fusión localizada seguida de solidificación rápida del material irradiado. Este fenómeno produjo redistribución del material fundido dentro de los canales texturizados, relleno parcialmente las regiones donde se esperaba remoción de material. Como consecuencia, las muestras tratadas con un número reducido de ciclos (<5 ciclos) presentaron una ligera expansión superficial dentro de la zona afectada por el calor (HAZ), mientras que para un mayor número de repeticiones se obtuvieron profundidades relativamente limitadas debido al efecto de refundición. Con base en estas observaciones, se seleccionaron ocho ciclos para las muestras no boronizadas, alcanzándose la profundidad

de 35 μm y 23 μm los patrones en las muestras BCT y BRT, mostradas en la Figura 8 (c) y (d), respectivamente. La geometría menos pronunciada en forma de “U” observada en estas muestras también puede asociarse a este efecto de refundición.

Adicionalmente, la acumulación de calor generada por las ocho pasadas del láser produjo una zona afectada por el calor excesivamente amplia en las muestras no boronizadas, lo que hizo necesario incrementar el espaciamiento entre líneas de texturizado hasta 300 μm . En contraste, estos efectos no fueron significativos en las muestras boronizadas, permitiendo utilizar únicamente dos ciclos de texturizado y una separación más compacta de 200 μm sin comprometer la definición geométrica de los canales.

En el caso de los patrones radiales, se observaron diferencias más marcadas en la sección transversal de las líneas de texturizado. Como se muestra en la Figura 8(b), aunque la profundidad máxima alcanzada permaneció dentro del mismo rango que el de las demás muestras, la mayor concentración térmica generó un incremento en el ancho de los canales y un relleno más pronunciado del material fundido. Como resultado, la sección transversal adquirió una morfología tipo “W” en lugar de la forma “U” observada en las otras configuraciones. Por otro lado, en la muestra BRT fue posible obtener una geometría en “U” bien definida y con profundidad máxima claramente delimitada utilizando únicamente dos ciclos de texturizado, como se aprecia en la Figura 9(d).

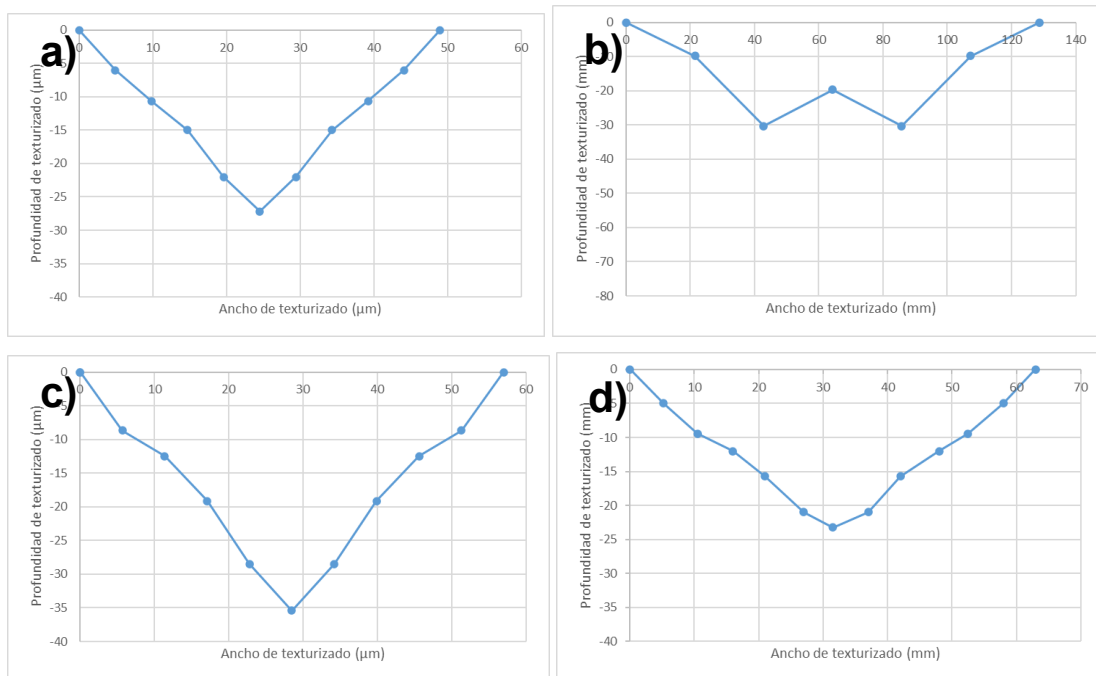
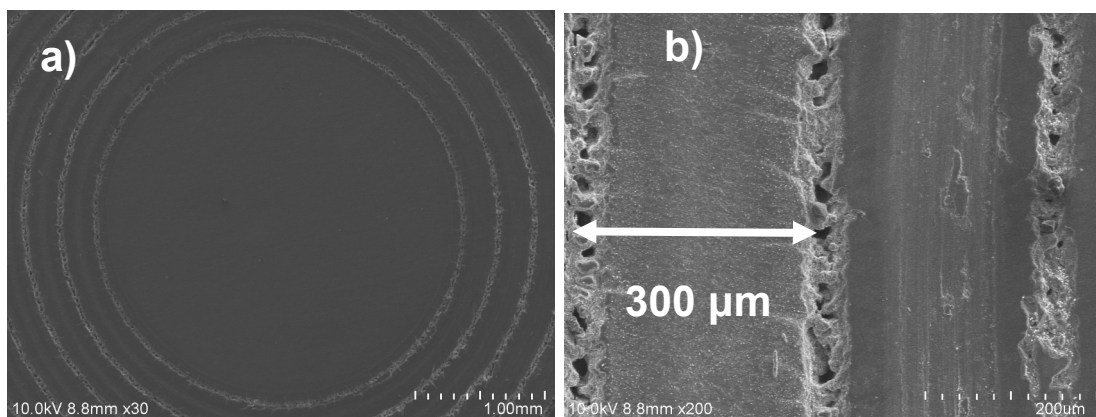


Figura 8. Vista transversal de líneas de texturizado para las muestras a) CT b) RT c) BCT y d) BRT.



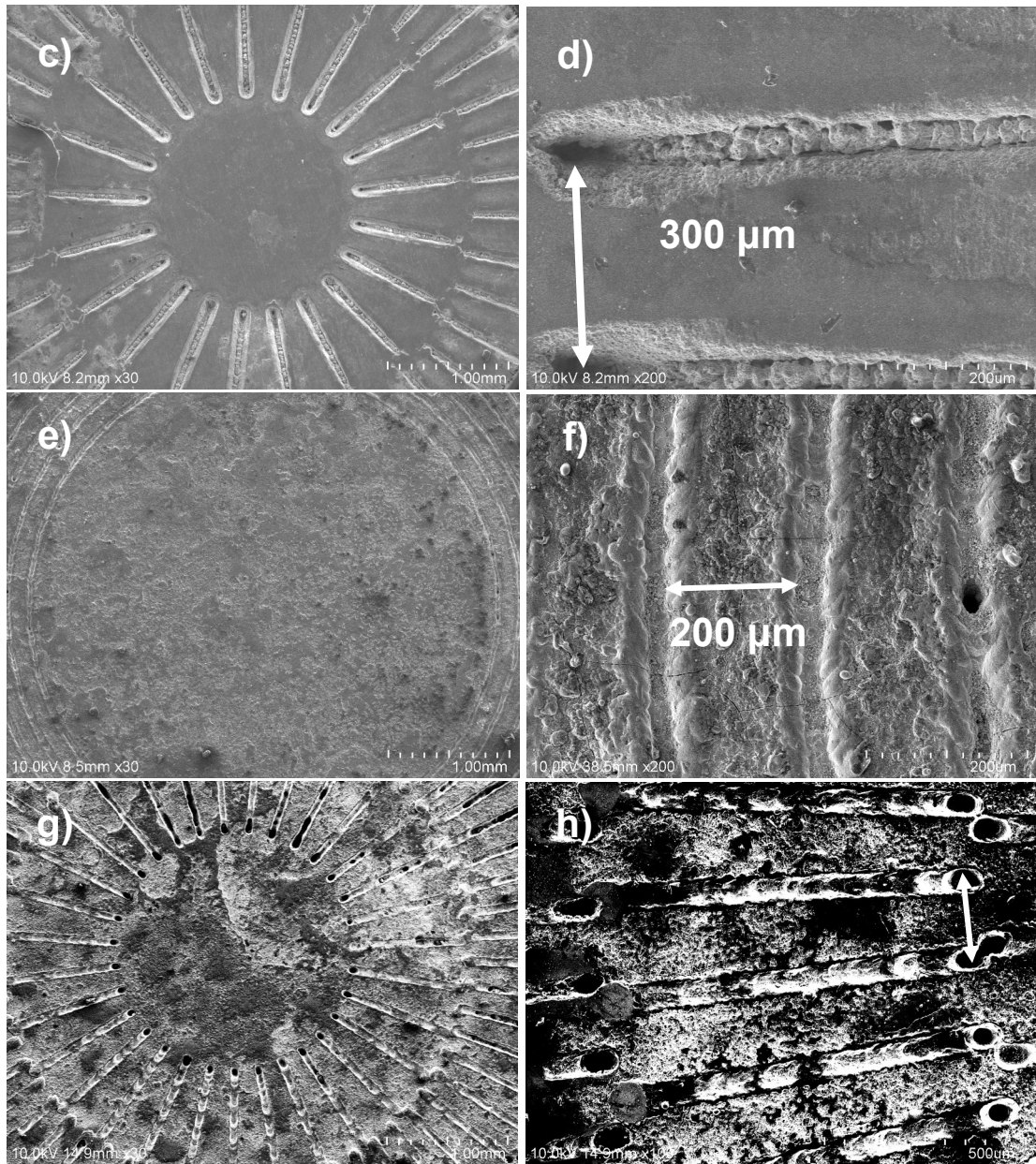


Figura 9. Micrografías SEM de a) patrón impreso en muestra (a) CT, (c) RT (e) BCT, (g) BRT b) acercamiento a líneas de texturizado de muestra CT, c) patrón impreso en muestra RT, d) acercamiento a líneas de texturizado de muestra RT e) patrón impreso en muestra BCT, f) acercamiento a líneas de texturizado de muestra CT g) patrón impreso en muestra BRT acercamiento a líneas de texturizado de muestra (b) CT, (d) RT, (f) BCT, (h) BRT.

4.2. Boronizado

El tratamiento de boronizado produjo una modificación significativa en la microestructura de la aleación Ti-6Al-4V. Como se observa en la Figura 10 (a), la microestructura evolucionó desde una morfología equiaxial en la condición de recepción hacia una estructura gruesa tipo Widmanstätten después del tratamiento térmico de boronizado, apreciable en la Figura 10 (b). Esta transformación microestructural se atribuye a la exposición de la aleación a 1050 °C durante el proceso, seguida de un enfriamiento lento dentro de la mufla, condiciones que favorecieron la formación de fases lamelares.

En términos generales, este tipo de microestructura puede generar diferencias importantes en el comportamiento mecánico y tribológico de la aleación Ti-6Al-4V. Las estructuras Widmanstätten suelen presentar valores de microdureza similares o incluso inferiores a los de las microestructuras equiaxiales, debido a la menor densidad de barreras al movimiento de dislocaciones asociada a la presencia de granos más grandes y alargados. Como consecuencia, este tipo de morfología puede favorecer un coeficiente de fricción más elevado y menos estable, así como una mayor susceptibilidad al desgaste en comparación con las estructuras equiaxiales [27].

La Figura 11 muestra la sección transversal de la muestra boronizada, donde puede observarse una morfología consistente con las hojuelas de boruros de titanio reportadas en la literatura [17]. Estas estructuras se extendieron desde la superficie hasta profundidades comprendidas entre 16 y 24 μm , en concordancia con los espesores de capa previamente reportados para condiciones similares de boronizado por empaquetamiento [23].

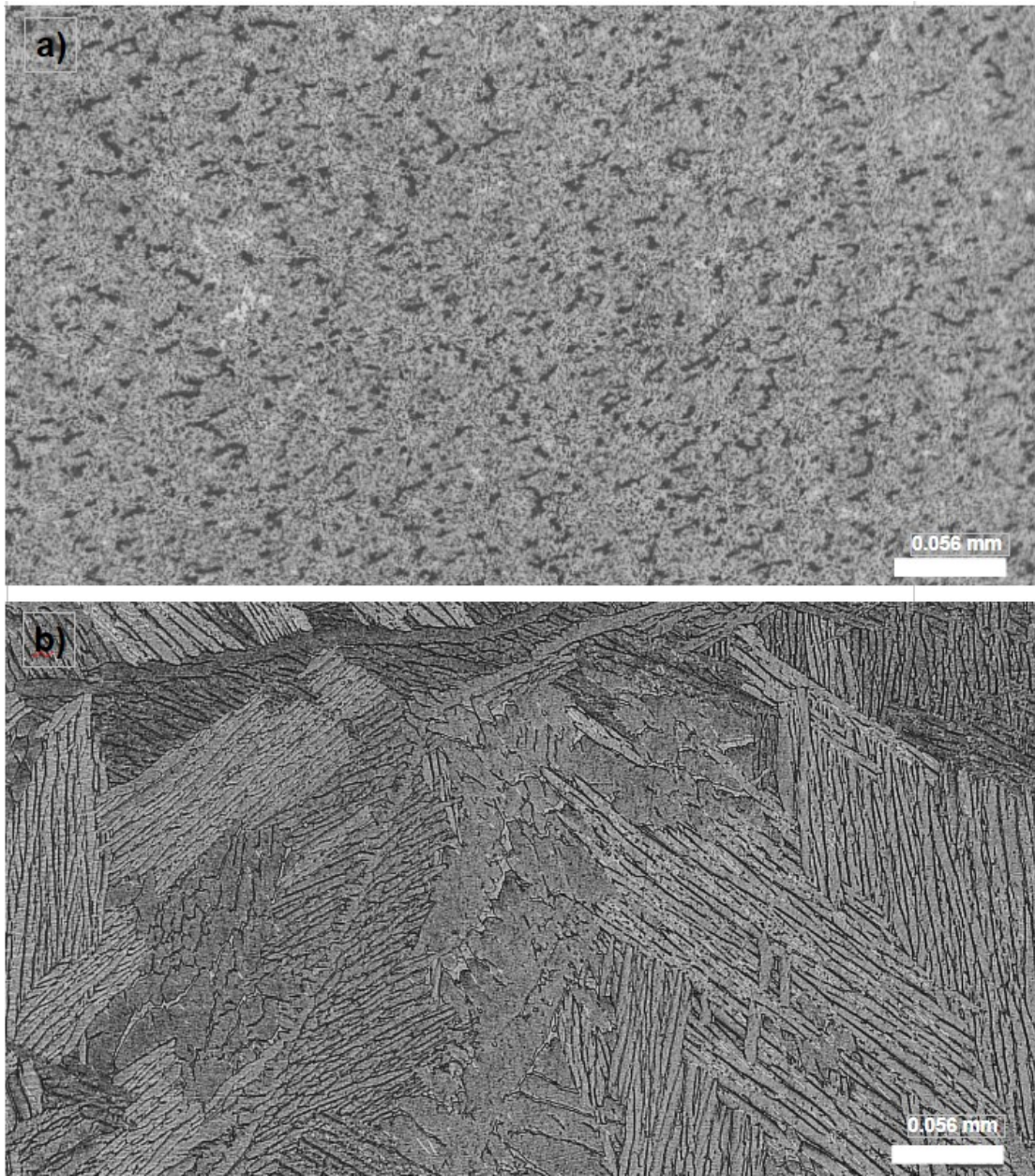


Figura 10. Imagen óptica de la microestructura de la aleación Ti-6Al-4V (a) en estado de recepción (b) después del boronizado.

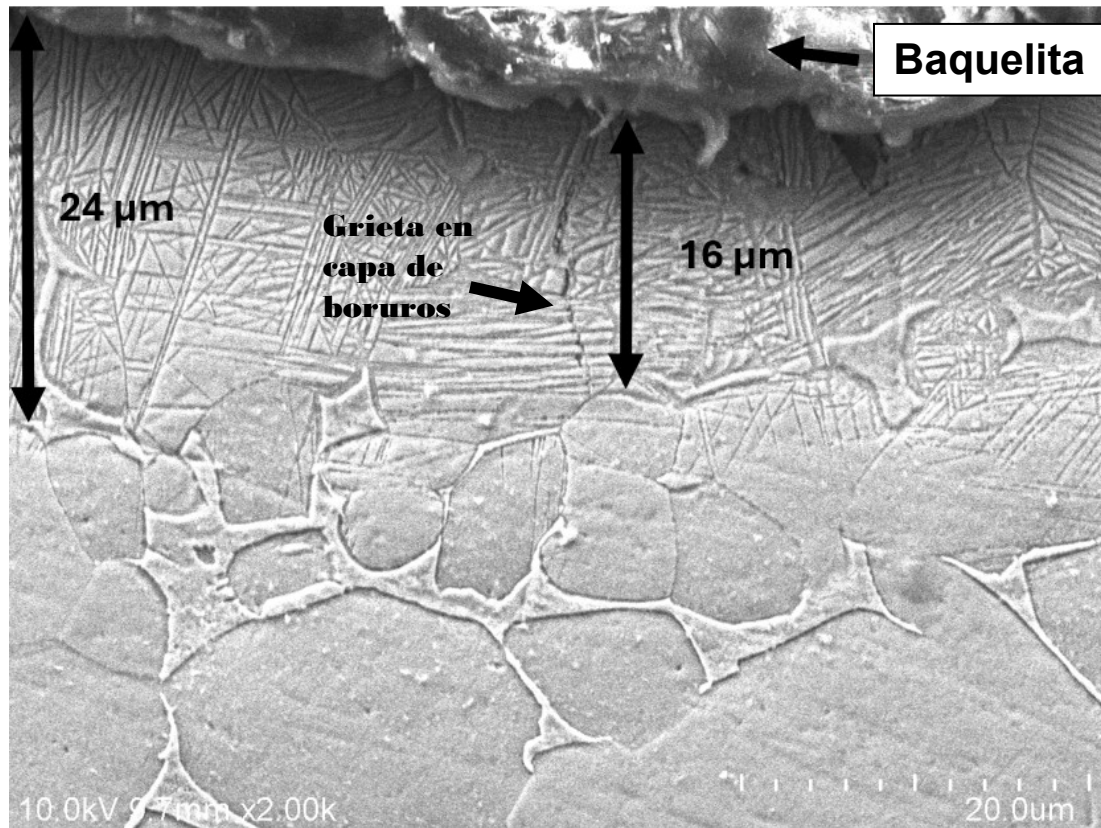


Figura 11. Imagen SEM de la sección transversal de muestra B.

Asimismo, aunque la capa de boruros se presenta mayormente continua, en la misma figura puede identificarse la presencia de una grieta dentro de la capa modificada. Esta discontinuidad sugiere que el comportamiento tribológico, particularmente el coeficiente de fricción, pudo verse influenciado por defectos locales en la capa de boruros de titanio. La formación de este tipo de discontinuidades ha sido asociada a tensiones residuales y fragilidad de la capa borurada, por lo que variaciones en los parámetros de tiempo y temperatura de boronizado podrían favorecer la obtención de capas más homogéneas y libres de defectos superficiales [23].

4.3. Coeficiente de fricción en tribómetro

La evolución del coeficiente de fricción en función de la distancia de deslizamiento para las diferentes configuraciones de muestra se presenta en la . No se observaron variaciones abruptas del coeficiente de fricción a lo largo del ensayo tribológico, lo que indica que las huellas de desgaste no alcanzaron una profundidad suficiente para comprometer la efectividad de los tratamientos superficiales durante la distancia total recorrida.

Las curvas correspondientes a las muestras control y a aquellas tratadas únicamente mediante texturizado láser, mostradas en la (a), (c) y (d), exhibieron un comportamiento relativamente estable a lo largo del experimento. En contraste, las muestras boronizadas, representadas en la (b), (e) y (f), presentaron valores de coeficiente de fricción considerablemente más elevados y una mayor dispersión temporal. Sin embargo, no se observó una tendencia continua de incremento o disminución entre las diferentes repeticiones del ensayo, lo que sugiere que el tratamiento de boronizado aún presenta limitaciones para la formación de una capa de boruros de titanio completamente homogénea y superficialmente uniforme.

De la Tabla 4 se observa que el texturizado láser no produjo cambios significativos en el coeficiente de fricción promedio de las muestras no boronizadas. La muestra CT presentó únicamente una ligera reducción respecto a la muestra UT, disminuyendo de 0.27 a 0.26, mientras que la muestra RT mantuvo un valor promedio de 0.27. En contraste, al comparar las condiciones B y BCT, se observó un incremento en el coeficiente de fricción promedio, pasando de 0.46 a 0.49 después de aplicar el tratamiento de texturizado láser.

Por otro lado, la aplicación del patrón radial sobre muestras boronizadas produjo una disminución del coeficiente de fricción de 0.46 a 0.41 comparando la muestra B con la BRT. Este resultado sugiere que la geometría radial ejerció

una influencia significativa en el comportamiento tribológico bajo lubricación. Este efecto puede estar relacionado con las diferencias observadas en la morfología transversal de las líneas texturizadas de la muestra BRT respecto a la muestra RT, ya que las primeras presentaron menor profundidad y anchura, además de una geometría caracterizada por un único valle transversal más definido.

Esta disminución también puede estar asociada a que, al tener barreras radiales, el lubricante se puede estar comprimiendo cada que el pin se encuentra con una protuberancia creada por el calor alrededor de la línea de texturizado, causando un efecto hidrodinámico donde aparece una película protectora de líquido que ejerce mayor presión entre el pin y el contrapin. Estas altas presiones sobre el lubricante concordarían con el acabado pulido y limpio que se observa en la huella de desgaste entre líneas de texturizado de la Figura 14 (h) y (j).

El incremento general del coeficiente de fricción observado en las muestras boronizadas y boronizadas + texturizadas, en comparación con las condiciones no boronizadas, puede atribuirse a la transformación microestructural de la aleación desde una morfología equiaxial hacia una estructura lamelar tipo β . Se ha reportado que esta transición microestructural incrementa el coeficiente de fricción en aleaciones Ti-6Al-4V [27], debido a que las estructuras equiaxiales presentan una deformación plástica más homogénea y coordinada, lo que reduce la concentración local de esfuerzos cortantes y favorece un mejor desempeño tribológico.

Tabla 4. Coeficiente de fricción promedio calculado de las 3 muestras para cada configuración de tratamientos.

Muestra	UT	B	CT	RT	BCT	BRT
Coeficiente de fricción	0.27	0.46	0.26	0.27	0.49	0.41

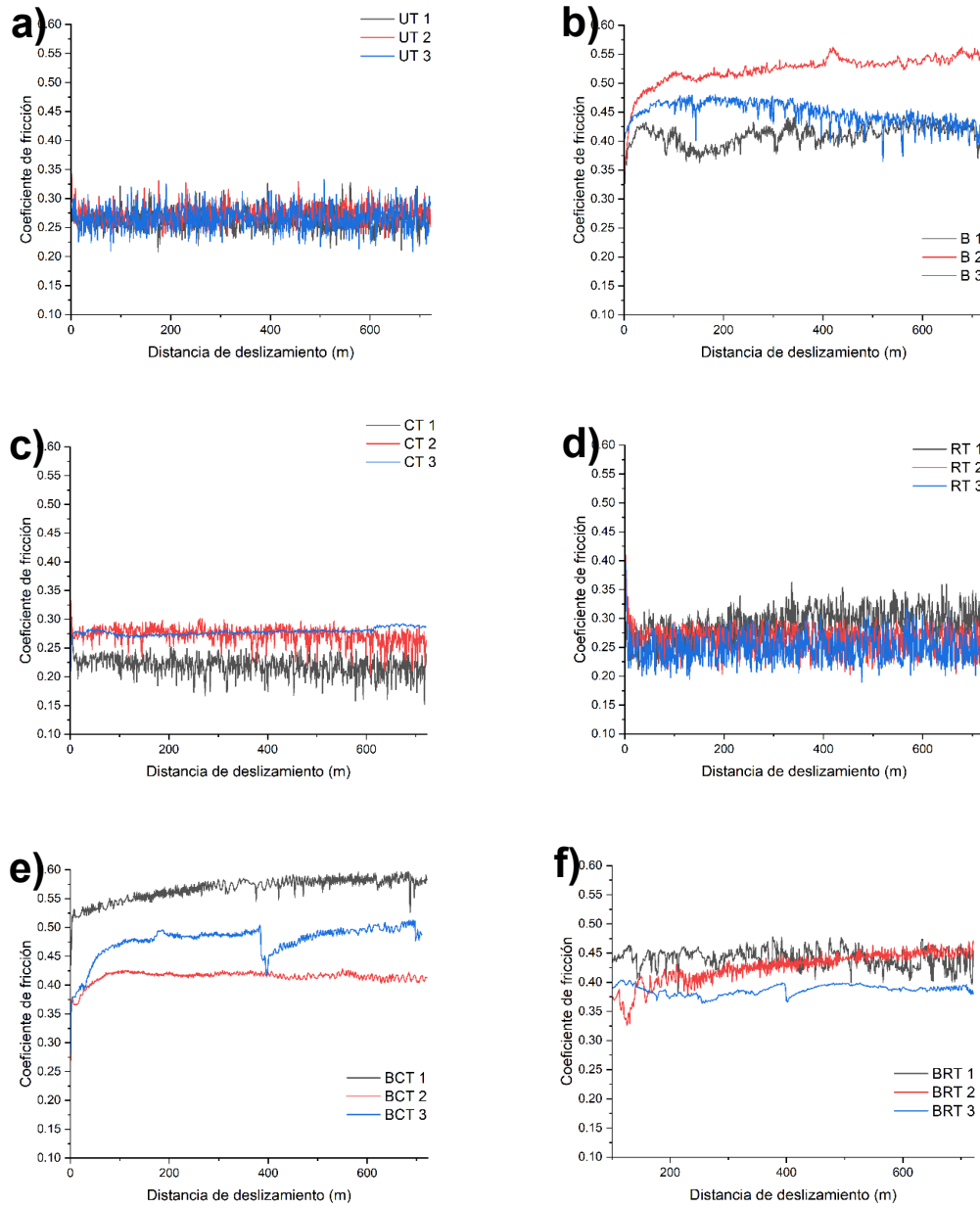


Figura 12. Gráficas del coeficiente de fricción medido a través del tiempo para los diferentes tipos de muestra, creadas con la información arrojada por el tribómetro para las muestras (a) UT (b) B (c) TC (d) TR (e) BCT (f) BRT

4.4. Microscopía de medición

La Tabla 5 resume la pérdida de volumen medida durante los ensayos tribológicos para las diferentes configuraciones de muestra. La mayor pérdida de material correspondió a la muestra sin tratamiento (UT), mientras que todas las condiciones tratadas mostraron una reducción del desgaste en distinta magnitud. Las muestras boronizadas (B) presentaron aproximadamente la mitad de la pérdida de volumen registrada para la condición UT, lo que demuestra que el tratamiento de boronizado por empaquetamiento mejoró significativamente el comportamiento tribológico de la aleación Ti-6Al-4V, aun cuando produjo un incremento en el coeficiente de fricción.

Las muestras texturizadas exhibieron una reducción de desgaste considerablemente mayor comparadas con las muestras únicamente boronizadas, siendo las configuraciones BCT y BRT las que presentaron los menores valores de volumen perdido. Estos resultados sugieren que el texturizado superficial desempeñó el papel más relevante en la mejora de la resistencia al desgaste bajo las condiciones evaluadas.

El comportamiento superior observado en las muestras boronizadas y texturizadas puede atribuirse al efecto combinado de la mayor dureza superficial proporcionada por la capa de TiB y de la capacidad de los canales texturizados para actuar como reservorios de lubricante y favorecer su redistribución dentro de la interfaz tribológica. Este mecanismo contribuye a reducir el contacto directo entre asperezas y a disminuir la severidad del desgaste durante el deslizamiento.

No obstante, la mejora observada en las muestras BRT y BCT con respecto a las condiciones RT y CT no correspondió a una suma lineal de los beneficios esperados al combinar ambos tratamientos. Esto sugiere que factores adicionales influyeron en el desempeño tribológico final. En particular, es probable que la modificación de las propiedades superficiales inducida por el

boronizado alterara la interacción entre el haz láser y la superficie de la aleación, dando lugar a cambios efectivos en las condiciones de texturizado y, en consecuencia, a una morfología superficial más favorable.

Como puede observarse en la Figura 9. Micrografías SEM de a) patrón impreso en muestra (a) CT, (c) RT (e) BCT, (g) BRT b) acercamiento a líneas de texturizado de muestra CT, c) patrón impreso en muestra RT, d) acercamiento a líneas de texturizado de muestra RT e) patrón impreso en muestra BCT, f) acercamiento a líneas de texturizado de muestra CT g) patrón impreso en muestra BRT acercamiento a líneas de texturizado de muestra, las muestras BCT y BRT presentaron una mayor continuidad y uniformidad en los canales texturizados, mientras que las muestras CT y RT mostraron regiones localizadas con profundidades superiores al promedio del canal. Esta mayor homogeneidad geométrica indica un patrón superficial más controlado y periódico, condición que ha sido asociada con distribuciones de esfuerzo más uniformes y menores tasas de desgaste [28, 29].

Tabla 5. Volumen perdido promedio después de la prueba de desgaste en tribómetro tipo ball-on-disk y el número de veces que el desgaste fue reducido con respecto a la muestra sin tratamientos.

Muestra	Volumen perdido (mm^3)	Veces que el desgaste fue reducido
UT	6.86 ± 0.32	-
B	4.10 ± 1.47	1.7x
CT	0.78 ± 0.11	8.8x
RT	0.66 ± 0.11	10.3
BCT	0.37 ± 0.08	18.5x
BRT	0.25 ± 0.05	27.2

4.5. Microdureza Vickers

La microdureza de la aleación Ti-6Al-4V en condición sin tratamiento (UT) fue evaluada obteniéndose un valor promedio de 356 HV. En contraste, para las muestras boronizadas (B) se realizaron mediciones de microdureza sobre la sección transversal a intervalos de 0.12 mm desde la superficie tratada, registrándose un valor máximo de 491 HV en la región más cercana a la capa borurada. La microdureza disminuyó gradualmente conforme aumentó la distancia respecto a la superficie modificada.

La variación del perfil de microdureza a través de la sección transversal de las muestras boronizadas se presenta en la Figura 13. Estos resultados confirman que el tratamiento de boronizado incrementó de manera efectiva la dureza superficial de la aleación, contribuyendo significativamente a la reducción del desgaste observada en las muestras tratadas. Este efecto resultó suficientemente relevante para compensar el incremento en el coeficiente de fricción y los cambios microestructurales inducidos por el tratamiento térmico asociado al proceso de boronizado.

Tabla 6. Dureza medida a diferentes distancias de la superficie de la muestra boronizada.

Distancia (mm)	Dureza (HV)
0.12	491
0.24	487
0.36	452
0.48	426
0.6	374

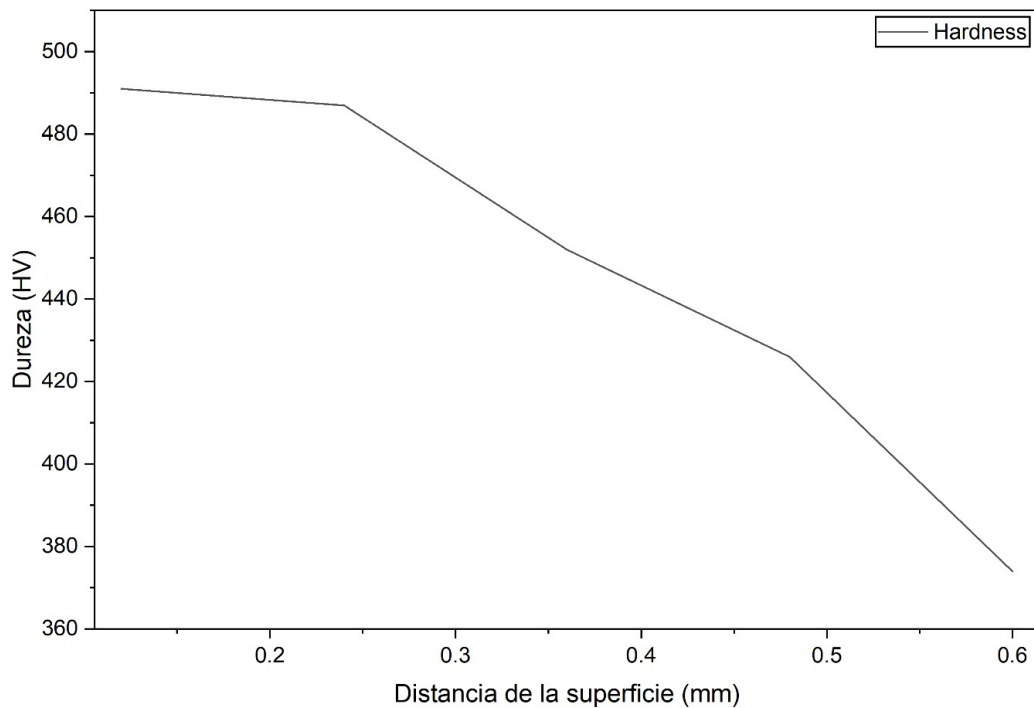


Figura 13. Gráfica de dureza al aumentar la distancia con respecto a la superficie.

4.6. Imágenes SEM de huella de desgaste

La Figura 14 presenta una micrografía SEM de las superficies desgastadas correspondientes para cada una de las muestras del estudio, donde puede apreciarse el ancho de la huella de desgaste generada durante el ensayo tribológico tipo ball-on-disk, así como ampliaciones de dichas regiones que permiten distinguir el contraste entre la zona sometida al contacto deslizando y las áreas no afectadas por el contracuerpo durante el experimento.

El ancho de las huellas de desgaste se redujo drásticamente —aproximadamente tres veces— en las muestras texturizadas en comparación con la condición UT. Sin embargo, la principal disminución del desgaste estuvo asociada a una menor profundidad de penetración de la huella más que a una

reducción significativa de su anchura. Aunque las muestras CT y BCT presentaron anchos de huella similares, la pérdida de volumen de la muestra BCT fue aproximadamente dos veces menor, evidenciando una reducción más efectiva en la remoción de material.

En la Figura 14 (b), correspondiente a la muestra UT, la bola de alúmina —de mayor microdureza que la aleación Ti-6Al-4V produjo un rayado fino y continuo sobre la superficie más blanda del titanio. La presencia de líneas largas y delgadas en la dirección de deslizamiento indica un mecanismo dominante de desgaste abrasivo leve. Asimismo, las regiones relativamente lisas entre las marcas de desgaste sugieren una contribución moderada de adhesión superficial. No se observaron fenómenos importantes de delaminación; sin embargo, parte del material experimentó deformación plástica y alisamiento superficial. La ausencia de reservorios para partículas de desgaste favoreció la permanencia de residuos abrasivos dentro de la interfaz tribológica, promoviendo un proceso continuo de rayado y remoción de material.

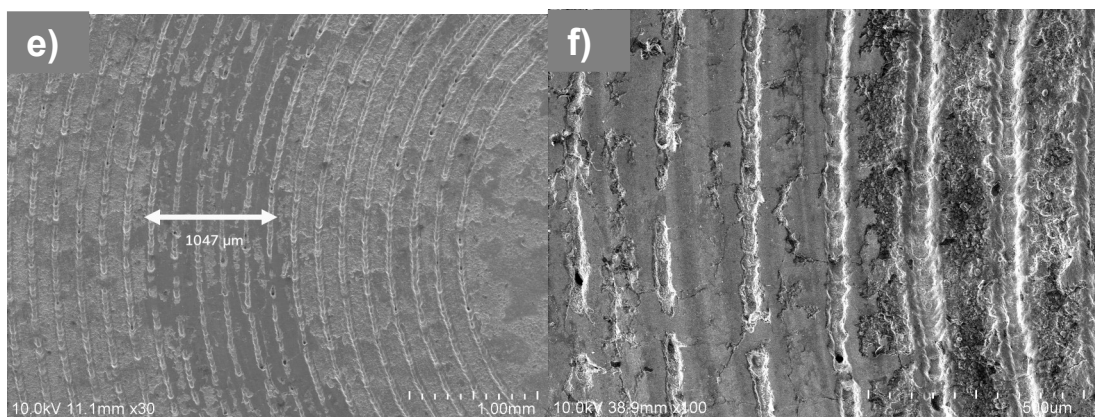
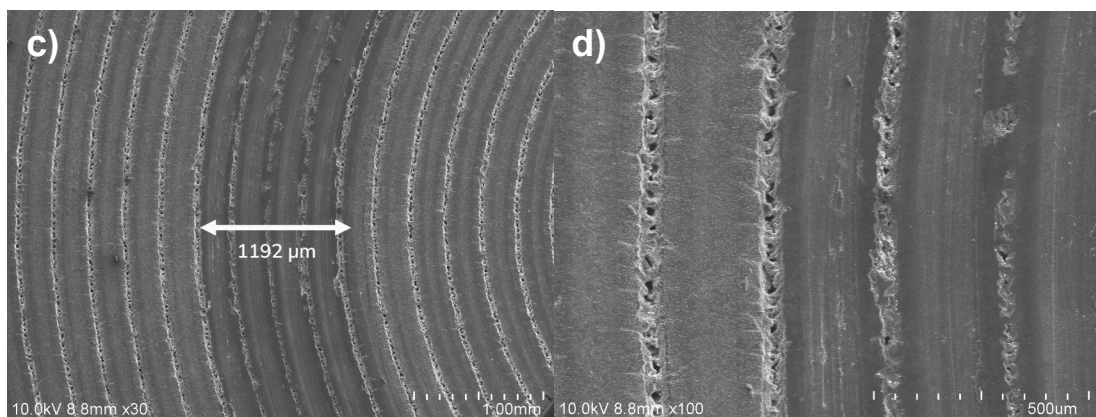
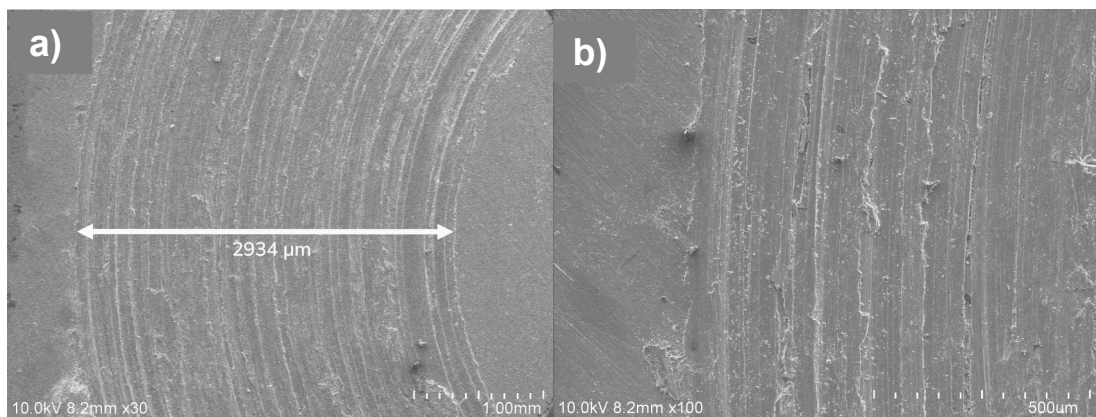
En las muestras CT y RT, correspondientes a la Figura 14 (c), (d), (e) y (f) se produjo una reducción del área real de contacto, lo que disminuyó la cantidad de partículas atrapadas dentro del sistema tribológico y, en consecuencia, redujo la abrasión de tres cuerpos. En la Figura 14 (d) y (h) pueden observarse regiones considerablemente más limpias entre los canales texturizados en comparación con las líneas abrasivas presentes en la muestra UT. Particularmente en la muestra RT, se aprecia una superficie notablemente más pulida entre las líneas de texturizado, donde prácticamente no se observan marcas severas de desgaste.

Por otro lado, las muestras boronizadas y texturizadas, mostradas en la Figura 14 (f) y (j), no presentan la formación continua de surcos profundos entre las líneas de texturizado, aun cuando exhiben una superficie más rugosa y heterogénea. También se identificaron microfracturas localizadas en los

bordes de los canales generados mediante texturizado láser circular, probablemente asociadas a la mayor fragilidad de la capa borurada. No obstante, la deformación plástica fue considerablemente menor y los surcos generados durante el desgaste resultaron mucho menos profundos en comparación con las muestras sin tratamiento.

En la muestra BRT se observó nuevamente una superficie con apariencia pulida, lo que sugiere un mecanismo tribológico distinto asociado a la geometría radial. Este comportamiento coincide con el menor coeficiente de fricción registrado para esta condición respecto a las muestras B y BCT, así como con la menor pérdida de volumen reportada en la Tabla 5. Los resultados indican que la orientación radial del texturizado favoreció condiciones de lubricación más estables y efectivas durante el deslizamiento.

Adicionalmente, en las imágenes SEM de la Figura 14 pueden distinguirse variaciones periódicas en los tonos de gris a los lados de las líneas texturizadas, lo que sugiere la presencia de elevaciones y depresiones superficiales generadas durante el procesamiento láser. En las muestras con geometría radial correspondientes a las Figuras 14 (g), (h) (i) y (j), mostraron el mejor desempeño tribológico, estas características podrían favorecer la generación de regiones localizadas de mayor presión hidrodinámica del lubricante. Durante el deslizamiento perpendicular a las líneas texturizadas, el pin experimenta una secuencia continua de ascenso y descenso sobre la superficie, promoviendo la compresión del fluido atrapado entre los canales y la formación de microcuñas hidrodinámicas. Este efecto facilita la expulsión controlada de lubricante hacia la interfaz de contacto, favoreciendo la estabilidad de la película lubricante, reduciendo el contacto directo entre asperezas, disminuyendo la adhesión y limitando la formación de surcos abrasivos sobre la superficie.



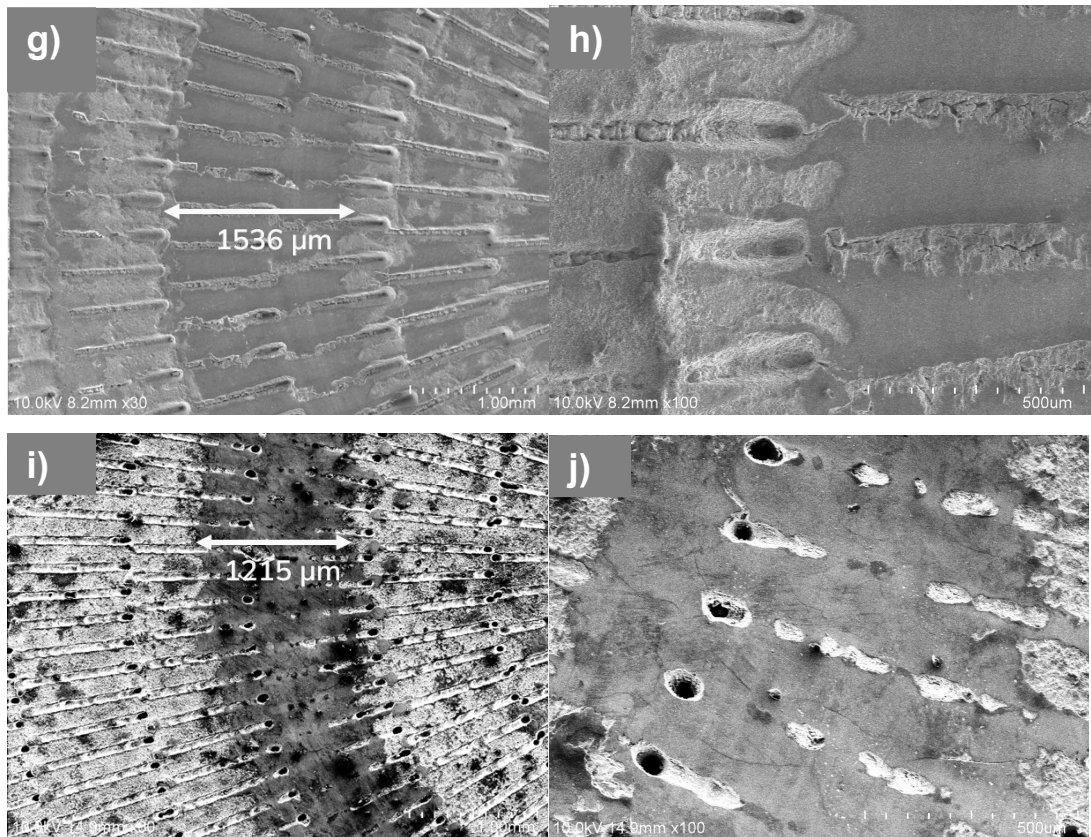


Figura 14. Micrográficas SEM de la zona afectada por el desgaste en la superficie de la muestra (a) UT, (c) CT, (e) BCT, (g) RT (i) BRT y un acercamiento en el límite entre la zona no desgastada con la huella de desgaste para muestras (b) UT (huella de desgaste a la derecha) (d) (huella de desgaste a la derecha), (f) BCT (huella de desgaste a la izquierda), (h) RT (huella de desgaste a la derecha) y (j) BRT (huella de desgaste al centro).

CAPÍTULO 5. Conclusiones

- El desgaste de las muestras de aleación Ti-6Al-4V se redujo mediante la aplicación de tratamientos superficiales de texturizado láser, boronizado y la combinación de ambos. La mayor reducción de desgaste se obtuvo en las muestras boronizadas con texturizado radial, con un volumen perdido de $0.25 \pm 0.05 \text{ mm}^3$, comparado con el de la muestra sin tratamientos de $6.86 \pm 0.32 \text{ mm}^3$, lo que significó un desgaste aproximadamente 27 veces menor que el de la aleación en su condición original.
- El boronizado por empaquetamiento produjo la formación de una capa mayormente continua de hojuelas de boruro de titanio, con una profundidad máxima de aproximadamente $24 \text{ }\mu\text{m}$ y un incremento significativo de la microdureza superficial al cambiar de un promedio de 356 HV para la muestra sin tratamiento, a un valor máximo de 491 HV hacia la superficie de la muestra boronizada. Este tratamiento contribuyó de manera importante a la disminución de la pérdida de volumen durante el ensayo tribológico ball-on-disk, aunque también provocó un aumento considerable en el coeficiente de fricción de todas las muestras boronizadas en comparación con las muestras control y únicamente texturizadas.
- El tratamiento de boronizado favoreció la generación de texturas superficiales más uniformes sobre la aleación Ti-6Al-4V durante el procesamiento láser, reduciendo el efecto de relleno asociado a la refundición del material y mejorando la definición geométrica de los canales texturizados.
- La máxima microdureza de la capa borurada se registró en las regiones cercanas a la superficie de las muestras BCT, alcanzando un valor de 491 HV.
- No se observaron variaciones significativas del coeficiente de fricción a través de la distancia los ensayos ball-on-disk, lo que indica que los efectos beneficiosos de los tratamientos superficiales permanecieron activos hasta

el final del experimento, después de una distancia total de deslizamiento de 721 m.

- Las muestras boronizadas y texturizadas presentaron zonas localizadas de tribocapa rugosa y microfracturas en los bordes de los canales texturizados; sin embargo, mostraron una reducción notable en la formación de surcos continuos de desgaste. Esto sugiere que la superficie endurecida por la presencia de boruros de titanio limitó la penetración del contracuerpo y disminuyó la remoción de material, aun en presencia de daño frágil localizado.
- Las muestras con texturizado radial exhibieron una reducción de desgaste considerablemente mayor en comparación con aquellas con geometría circular. Este comportamiento sugiere la presencia de un mecanismo tribológico menos agresivo asociado a la orientación perpendicular entre la dirección de deslizamiento y las líneas de texturizado, favoreciendo condiciones de lubricación más estables y una menor interacción directa entre superficies.

Recomendaciones

Los parámetros empleados durante el tratamiento de boronizado aún pueden optimizarse con el fin de obtener capas de boruros de titanio más homogéneas y continuas, lo que potencialmente permitiría reducir tanto el coeficiente de fricción como la pérdida de volumen durante el desgaste.

Sería de interés evaluar de manera aislada el efecto de la transformación microestructural inducida por el boronizado por empaquetamiento a 1050 °C durante 5 h sobre el comportamiento tribológico de la aleación Ti-6Al-4V. Para ello, podrían realizarse ensayos de desgaste de mayor duración, suficientes para remover completamente la capa borurada y analizar posteriormente la evolución del coeficiente de fricción y del mecanismo de desgaste asociado a la microestructura lamelar remanente.

El incremento en el número de ciclos de irradiación láser para los patrones circulares y radiales podría favorecer la obtención de canales texturizados de mayor profundidad, manteniendo al mismo tiempo una geometría uniforme. Esto podría contribuir a prolongar el efecto beneficioso del texturizado sobre la reducción del desgaste al incrementar la capacidad de retención de lubricante y la estabilidad de la película tribológica durante el deslizamiento.

Referencias

- [1] F. Melo-Fonseca, . M. Gasik, P. P. Freitas, D. Nuno Carvalho, I. Mendes Pinto, F. . S. Silva y G. Miranda, «Hydrothermal treatment of laser micro-textured Ti6Al4V systems for osseointegration of orthopaedic implants,» *Optics and Lasers in Engineering*, 2024.
- [2] W. Abd-Elaziem, M. A. Darwish, A. Hamada y W. M. Daoush, «Titanium-Based alloys and composites for orthopedic implants Applications: A comprehensive review,» *Materials & Design*, vol. 241, 2024.
- [3] K. Posiyano, R. Prasad, T. Dzogbewu, E. Olakanmi, T. Leso, K. Setswalo y A. Sello, «The potential of Ti-6Al-7Nb, and design for manufacturing considerations in mitigating failure of hip implants in service,» *Biomedical Engineering Advances*, vol. 8, 2024.
- [4] D. Bijukumar, A. Segu, J. Souza, X. Li, M. Barba, L. Mercuri, J. Jacobs y M. Mathew, «Systemic and local toxicity of metal debris released from hip prostheses: A review of experimental approaches,» *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, vol. 14, nº 3, pp. 951-963, 2018.
- [5] K. Harrington, E. Phelan, W. C. Torregiani y O. Doody, «The Management of the Symptomatic Patient With a Metal-on-Metal Hip Prosthesis,» *Canadian Association of Radiologists Journal*, vol. 67, pp. 76-81, 2016.
- [6] D. Semaan, H. Rutledge, K. Berend, A. Lombardi, J. Adams y D. Crawford, «Survivorship of a Metal-on-Metal Total Hip Implant With Modular Titanium Adapter,» *The Journal of Arthroplasty*, vol. 37, pp. S560-S565, 2022.
- [7] N. S. Manam, W. S. Harun, D. N. Shri, S. A. Ghani, T. Kurniawan, M. H. Ismail y M. H. Ibrahim, «Study of corrosion in biocompatible metals for implants: A review,» *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 701, pp. 698-715, 2017.
- [8] T. Kokubo y H. Takadama, «How useful is SBF in predicting in vivo bone bioactivity?,» *Biomaterials*, vol. 27, pp. 2907-2915, 2006.
- [9] S. Shabir y M. Dutt Sharma, «Tribological behaviour of laser textured Ti3AlV 2.5V alloy under simulated body fluid,» *Tribology International*, vol. 200, 2024.

- [10 C. A. Cuao-Moreu, I. Campos-Silva, A. M. Delgado-Brito, E. O. Garcia-Sanchez, A. Juarez-Hernandez, J. M. Diabb-Zavala y M. A. L. Hernandez-Rodriguez, «Effect of laser surface texturing and boriding on the tribocorrosion resistance of an ASTM F-1537 cobalt alloy,» *Wear*, vol. 523, 2023.
- [11] A. Kumar y G. Singh, «Surface modification of Ti6Al4V alloy via advanced coatings: Mechanical, tribological, corrosion, wetting, and biocompatibility studies,» *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 989, 2024.
- [12 F. Pisanu, M. Andreozzi, E. Fiori, F. Altamore, M. Bartoli, G. Caggiari, S. Ortu, M. Rios, A. F. Manunta y C. Doria, «Surgical management of hip prosthetic failure in metallosis: A case series and literature review,» *Journal of Orthopaedics*, vol. 28, pp. 10-20, 2021.
- [13 I. Swiatkowska, N. Martin y A. J. Hart, «Blood titanium level as a biomarker of orthopaedic implant wear,» *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, vol. 53, pp. 120-128, 2019.
- [14 F. Xie, S. Sheng, J. Palan y H. G. Pandit, «Metal-on-metal hip resurfacing arthroplasty: is it safe and reliable? A synopsis of the past, the present, and the future of HRA,» *EFORT Open Reviews*, vol. 9, nº 8, pp. 751-761, 2024.
- [15 S. Rezaei Moghadamian, H. Esfahani, N. Lin y M. Nouri, «Development of high hard TiB–TiB₂ coatings on Ti implants for bio-tribological applications; applying Box-Behnken design and actual wear analyzing in simulated body fluids,» *Results in Surfaces and Interfaces*, vol. 16, 2024.
- [16 A. Borgwardt, L. Borgwardt, B. Zerah, H. Daugaard, L. Borgwardt y S. Ribel-Madsen, «A Randomized Seven-Year Study on Performance of the Stemmed Metal M2a-Magnum and Ceramic C2a-Taper, and the Resurfacing ReCap Hip Implants,» *The Journal of Arthroplasty*, vol. 30, pp. 1412-1420, 2018.
- [17 E. Atar, E. Sabri Kayali y H. Cimenoglu, «Characteristics and wear performance of borided Ti6Al4V alloy,» *Surface & Coatings Technology*, vol. 202, p. 4583–4590, 2008.
- [18 D. Madapana, R. Bathe, I. Manna y J. D. Majumdar, «Laser surface structuring of titanium alloy (Ti-6Al-4V) for improved tribocorrosion resistance for bio-implant applications,» *Tribology International*, 2024.

- [19 L. Li , Z. Li, Z. Xing, W. Guo, Y. Huang y H. Wang, «Effect of femtosecond
] laser bionic texture on anti-wear properties of medical Ti-6Al-4V,»
Tribology International, vol. 190, 2023.
- [20 A. Kalinowski, N. Radek , Ł. Orman , J. Pietraszek , M. Szczepaniak y J.
] Bronček , «Laser Surface Texturing: Characteristics and Applications,»
System Safety: Human - Technical Facility - Environment, vol. 5, pp. 240-
248, 2023.
- [21 M. P. Fiorucci, A. J. López y A. Ramil, «Multi-scale characterization of
] topographic modifications on metallic biomaterials induced by
nanosecond Nd:YVO4 laser structuring,» *Precision Engineering*, vol. 53,
pp. 163-168, 2018.
- [22 Z. Wang, Y.-B. Li, C.-W. Wang y Q.-Z. Zhao, «Angle-dependent lubricated
] tribological properties of stainless steel by femtosecond laser surface
texturing,» *Optics & Laser Technology*, vol. 81, pp. 60-66, 2016.
- [23 P. Li, Y. Duan, Z. Chen, J. Shi y L. Ma, «Surface evolution and growth
] kinetics of Ti6Al4V alloy in pack boriding,» *Journal of Alloys and
Compounds*, vol. 742, pp. 690-701, 2018.
- [24 N. Li, D. He, D. Liu, L. Ma, C. He, Y. Xu y J. Yu, «In-situ TiB reinforced
] titanium matrix composite coatings prepared by laser cladding: Effect of
TiB2 content on microstructure, hardness and wear properties,» *Journal
of Alloys and Compounds*, vol. 1010, 2025.
- [25 T. Chen y S. Koyama, «Influence of boriding temperature on
] microstructure and tribological,» *Solid State Sciences* , vol. 107, 2020.
- [26 N. Mills, M. Jenkins y S. Kukureka, «Engineering case studies,» de
] *Plastics Microstructure and Engineering Applications*, Elsevier eBooks,
2020, pp. 259-292.
- [27 T. Si, J. Geng, B. Ning, Y. Mao, Y. Chen, C. Jiang, N. Wang, Z. Hou, Q.
] Zhao, K. Hua y Y. Kang, « β phase morphology analysis for enhancing
friction properties and wear resistance of Ti-6Al-4V alloy,» *Tribology
International*, 2025.
- [28 B. Mao, A. Siddaiah, Y. Liao y P. L. Menezes, «Laser surface texturing
] and related techniques for enhancing tribological performance of
engineering materials: A review,» *Journal of Manufacturing Processes*,
vol. 53, pp. 153-157, 2020.

- [29 A. Arun, P. Lakshmanan, K. Parthiban, G. Kumanan y L. Arunkumar,
] «Experimental study on laser surface texturing and wear characterization of titanium alloy,» *Materials Today: Proceedings*, nº 62, pp. 615-618, 2022.
- [30 E. Ebrahimzadeh, P. A. Campbell, K. M. Takamura, Z. Lu, S. N. Sangiorgio,
] J. J. Kalma, K. A. De Smet y H. C. Amstutz, «Failure Modes of 433 Metal-on-Metal Hip Implants: How, Why, and Wear,» *Orthopedic Clinics of North America*, vol. 42, nº 2, pp. 241-250, 2011.
- [31 H. Zhang, H. Huang y J. Yan, «Simultaneous laser nitriding and
] biomimetic texturing: A synergistic strategy for enhancing mechanical properties and corrosion resistance of Ti6Al4V alloy,» *Journal of Materials Processing Tech.*, vol. 345, 2025.

Apéndices

A1. Composición del agente boronizante utilizado Ekabor 2®

Compuesto	Porcentaje	Función
B4C	5	Proporciona boro
SiC	90	Diluyente
KBF4	5	Activador

A2. Código de Python utilizado para medir el volumen de las huellas de desgaste.

```
import numpy as np
```

```
# Datos de la huella
```

```
data = [  
    (5500, 0),  
    (5542, 0.38004137),  
    (5693, -9.25361944),  
    (5766, -12.5930714),  
    (5935, -24.0638573),  
    (5978, -25.6747673),  
    (6166, -35.9736298),  
    (6217, -35.512151),  
    (6340, -40.3991727),  
    (6667, -47.4402792),  
    (6790, -51.3273009),  
    (6836, -51.9110651),  
    (6935, -56.0152534),  
    (7271, -55.9749224),  
    (7452, -57.3371251),
```

```

(7608, -55.9255429),
(7866, -51.5910031),
(8577, -39.1574457),
(8687, -35.1620993),
(9044, -19.9317477),
(9275, -7.84152017),
(9368, 0)
]

area_total = 0
volumen_total = 0

print(f'{"Intervalo X":<20} | {"Área Parcial":<15} | {"Volumen Parcial"}')
print("-" * 60)

for i in range(len(data) - 1):
    x1, y1 = data[i]
    x2, y2 = data[i+1]

    # Diferencia en X (ancho del trapecio)
    dx = x2 - x1

    # Altura promedio (valor absoluto de Y)
    y_promedio = (abs(y1) + abs(y2)) / 2.0

    # Área del trapecio individual
    area_i = y_promedio * dx

    # Radio promedio (distancia al eje Y)
    x_promedio = (x1 + x2) / 2.0

```

```

# Volumen del casquete ( $2 * \pi * \text{radio} * \text{area}$ )
volumen_i = 2 * np.pi * x_promedio * area_i

# Sumas acumuladas
area_total += area_i
volumen_total += volumen_i

# (Opcional) Ver cada paso
# print(f"{x1}-{x2:<14} | {area_i:<15.2f} | {volumen_i:.2e}")

print("-" * 60)
print(f"ÁREA TOTAL BAJO LA CURVA:    {area_total:,.2f} u2")
print(f"VOLUMEN SÓLIDO DE REVOLUCIÓN: {volumen_total:,.2f} u3")

```