



Proyecto final

Integridad superficial obtenida mediante electroerosionado y electropulido

Efecto del electroerosionado y electropulido sobre el Acabado e Integridad superficial de muestras de aleación de titanio Ti-6Al-4V y acero inoxidable 316L.

María Valentina González

Tutores:

Amadeo Daniel Sosa

Diego Colombo

Grupo Tecnología Mecánica

2022



RINFI se desarrolla en forma conjunta entre el INTEMA y la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-
NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).



Proyecto final

Integridad superficial obtenida mediante electroerosionado y electropulido

Efecto del electroerosionado y electropulido sobre el Acabado e Integridad superficial de muestras de aleación de titanio Ti-6Al-4V y acero inoxidable 316L.

María Valentina González

Tutores:

Amadeo Daniel Sosa

Diego Colombo

Grupo Tecnología Mecánica

2022

Contenido

1. Resumen
2. Introducción
 - 2.1. Aceros inoxidables
 - 2.2. Titanio
 - 2.3. Electroerosión (EDM y WEDM)
 - 2.4. Electropulido
 - 2.5. Integridad superficial
3. Objetivos
4. Metodología
 - 4.1. Material
 - 4.2. Probetas y electrodos
 - 4.3. Construcción de dispositivos y accesorios
 - 4.4. Preparación de muestras
 - 4.5. Ensayos de EDM
 - 4.6. Ensayos de WEDM
 - 4.7. Ensayos de electropulido en probetas de acero inoxidable y aleación de titanio
 - 4.7.1. Fuente de energía
 - 4.7.2. Electrolito
 - 4.7.3. Mecanismo de agitación y medición de temperatura
 - 4.7.4. Ánodo
 - 4.7.5. Cátodo
 - 4.7.6. Set up del ensayo y celda electrolítica
 - 4.8. Caracterización de superficies
 - 4.8.1. Observación con microscopio
 - 4.8.2. Medición de rugosidad
 - 4.8.3. Microindentación y dureza
5. Resultados
 - 5.1. Puesta a punto y desarrollo del set up para los ensayos de EDM

- 5.2. Caracterización de las superficies obtenidas por EDM y WEDM
 - 5.2.1. Imágenes obtenidas en microscopio óptico
 - 5.2.2. Rugosidad superficial
 - 5.2.3. Alteraciones en la dureza
- 5.3. Fabricación de dispositivo para ensayos de electropulido
- 5.4. Electropulido en probetas de acero inoxidable
 - 5.4.1. Puesta a punto
 - 5.4.2. Realización del ensayo
 - 5.4.3. Topografía superficial
 - 5.4.3.1. Imágenes obtenidas en microscopio óptico
 - 5.4.3.2. Rugosidad superficial
- 5.5. Electropulido en probetas de aleación de titanio
 - 5.5.1. Puesta a punto
 - 5.5.2. Realización del ensayo
 - 5.5.3. Topografía superficial
 - 5.5.3.1. Imágenes obtenidas en microscopio óptico
 - 5.5.3.2. Rugosidad superficial
- 5.6. Difracción de rayos X
- 6. Conclusiones
- 7. Trabajos futuros
- 8. Bibliografía

Integridad superficial obtenida mediante electroerosionado y electropulido

1. Resumen

Para la fabricación de componentes mecánicos se suelen emplear distintas operaciones de mecanizado basadas en los procesos de arranque de viruta. En componentes de materiales de alta resistencia, endurecidos, con superficies de geometría compleja que requieren altos niveles de acabado e integridad superficial, los procesos de fabricación convencionales no son adecuados. Por esto mismo, surgen los métodos no convencionales, los cuales utilizan energía térmica, eléctrica o electroquímica, como es el caso del electroerosionado y electropulido.

El proceso de electroerosión remueve material de la superficie mediante descargas eléctricas pulsantes, que generan altas temperaturas, fundiendo o vaporizando el material. Según la forma del electrodo y el movimiento relativo entre el electrodo y la pieza, se pueden encontrar diferentes procesos como: electroerosión por penetración (EDM) y electroerosión por hilo (WEDM). El proceso de electropulido remueve finas capas de material mediante una oxidación controlada en la pieza, siendo utilizado para mejorar el acabado superficial.

En este trabajo se aborda la aplicación de dichos procesos sobre dos aleaciones metálicas de uso creciente en la industria local, para los cuales se requiere de información confiable. Dichos materiales son: acero inoxidable AISI 316L y aleación de titanio grado V (Ti-6Al-4V). El primero tiene una gran aplicabilidad e importancia en la industria alimenticia y farmacéutica debido a la necesidad de tener superficies resistentes a la corrosión y lisas para facilitar su limpieza. Por otro lado, la aleación de titanio Ti-6Al-4V se utiliza para implantes por su buen comportamiento mecánico y resistencia a la corrosión. Se tomaron valores de referencia de trabajos anteriores y se variaron ciertos parámetros operativos para observar las diferencias en el acabado e integridad superficial de las muestras y determinar si cumplen los requerimientos.

En los ensayos de electroerosión por penetración, se dispuso a analizar la polaridad, el dieléctrico, el tipo de electrodo y la densidad de corriente. En el proceso de electroerosión por hilo, solo fue posible variar la potencia aplicada (combinación de intensidad de corriente, duración de pico y tiempo de relajación) durante el ensayo. Para la realización de los ensayos de electropulido, se analizaron las diferentes variables operativas: el electrolito, la temperatura, la densidad de corriente y el tiempo de ensayo.

Los resultados obtenidos en las superficies electroerosionadas indican qué parámetros son óptimos durante el ensayo. Por ejemplo, el ensayo en titanio con agua destilada como dieléctrico resultó ser más energético mientras que en el ensayo de acero inoxidable resultó serlo con kerosene. Por otro lado, se evidenció la formación de óxidos en algunas superficies por los colores observados en el microscopio, las altas durezas y las fases observadas por difracción de rayos x. La aplicación de electropulido en estas superficies resultó muy buena en Ti-6Al-4V donde se obtuvieron superficies con perfiles de rugosidad significativamente atenuados, con disminuciones de la rugosidad media aritmética de hasta

el 85%. En 316L no se alcanzó el mismo resultado ya que los perfiles de rugosidad no mostraron diferencias significativas antes y después del proceso.

2. Introducción

En la industria manufacturera local y regional, se han visto problemas al momento de fabricar y mecanizar componentes mecánicos. Los procesos de fabricación y mecanizado más comunes son por arranque de viruta. El problema surge en materiales de alta resistencia ya endurecidos, en los que se dificulta o se imposibilita el proceso convencional. Al mismo tiempo, existen componentes endurecidos con superficies de geometría compleja que requieren altos niveles de acabado e integridad superficial. En estos casos, suele emplearse procesos de corte y mecanizado basados en la aplicación de energía térmica, eléctrica o electroquímica, tales como electroerosión o electropulido.

Entre los métodos de mecanizado no convencionales, la electroerosión es un proceso muy utilizado en la industria para abordar los casos ya mencionados. El proceso de electroerosión remueve material de la superficie a través de descargas eléctricas pulsantes entre el electrodo de trabajo y la pieza a mecanizar. Estas descargas generan temperaturas muy altas, capaces de fundir o vaporizar el material de la superficie donde ocurrió la descarga. Tanto el electrodo como la pieza están sumergidas en un fluido dieléctrico. Su función es generar un plasma a través del cual se crea una trayectoria para cada descarga.

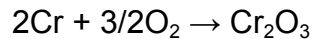
Como se mencionó, este proceso se caracteriza por temperaturas muy altas en las zonas de las descargas, es decir, sobre la superficie a mecanizar. Debido a las altas temperaturas desarrolladas durante el proceso es necesario tener un control sobre el mismo, ya que si no fuese así, podrían producirse daños físicos (tales como fisuras, huecos y material redepositado) y/o metalúrgicos en la superficie.

Los dos procesos principales en esta categoría son la electroerosión por penetración (EDM) y electroerosión por hilo (WEDM). El proceso EDM se utiliza para mecanizar cavidades ciegas o pasantes, donde el electrodo tiene la forma de la cavidad a mecanizar. El proceso WEDM utiliza un alambre de diámetro pequeño como electrodo de trabajo, el cual corta el material a medida que este avanza según el plano XY de forma relativa a la pieza con velocidad continua y lenta. A medida que se realiza el corte, el alambre es alimentado axialmente en forma continua entre un carrete de alimentación y uno de recuperación para mantener su diámetro constante.

Otro de los procesos no convencionales es el electropulido, el cual se utiliza para mejorar el acabado de una superficie. Este proceso remueve material de la superficie en muy pequeñas cantidades, eliminando una capa de unos pocos micrones o centésimas de milímetros. Se basa en el principio de la electrólisis, debido a la acción de un flujo de corriente entre un cátodo y un ánodo dentro de una solución empleada como electrolito. La ventaja de este proceso es que el tiempo de tratamiento es relativamente corto (2-30 minutos). Puede aplicarse sobre piezas de cualquier forma o tamaño, incluso en piezas estructuralmente débiles ya que no hay contacto ni esfuerzos sobre las mismas. El proceso consiste en producir una oxidación controlada en la pieza y se obtienen superficies con una textura uniforme, sin introducir tensiones residuales, fáciles de limpiar y de rugosidad inferior a la del proceso previo. El proceso es más complejo cuando el material está constituido por dos o más fases, o hay presencia de inclusiones.

2.1. Aceros inoxidables

Los aceros inoxidables son aleaciones que se seleccionan principalmente por su excelente resistencia a la corrosión, la cual es debida al alto contenido de cromo (Cr). El cromo “pasiva” la superficie del acero formando una capa de óxido que lo protege de la corrosión. El material en estado pasivado se encuentra cubierto con una capa de óxido muy fina e invisible, formada por el cromo que reaccionó con el medio ambiente. La capa es continua, no porosa, insoluble y se autorregenera en presencia de oxígeno.



La cantidad mínima de cromo requerida para lograr pasividad es del 12%. Incrementando el contenido de cromo por encima del 12%, el acero podrá ser pasivado en medios más agresivos. Además del cromo, estos aceros pueden estar aleados con Níquel (Ni), Molibdeno (Mo), Aluminio (Al), etc.

En base a su composición y microestructura, los aceros inoxidables se clasifican en cinco grupos principales:

- Ferríticos: Estas aleaciones, normalmente, contienen entre 12 y 30% de cromo.
- Martensíticos: Estas aleaciones tienen contenidos relativamente bajos de cromo (12 - 17%) y altos de carbono (0,1 - 1%).
- Endurecibles por precipitación: Son aleación base hierro, con cromo entre 12% y 18% y níquel entre 4% y 9%, con la presencia de elementos aleantes que producen el endurecimiento por precipitación.
- Duplex: Fueron desarrollados con el objetivo de combinar algunas de las mejores características de los aceros inoxidables austeníticos y ferríticos. Son aleaciones base hierro con cromo, molibdeno y una cantidad de estabilizadores de la austenita, como níquel y nitrógeno.
- Austeníticos: son aleaciones hierro-cromo-níquel, que tienen contenidos entre 16 y 25% de cromo y entre 7 y 20% de Níquel. A temperatura ambiente mantienen una estructura austenítica. Presentan bajo límite elástico y gran índice de endurecimiento por deformación, alta tenacidad a la fractura y baja temperatura de inicio de la transformación martensítica. Son los aceros inoxidables más utilizados, debido a su buen comportamiento a la corrosión y sus buenas propiedades mecánicas. Son utilizados en aplicación a temperatura ambiente, a altas temperaturas (hasta 1000°C) y a temperatura criogénicas.

El acero inoxidable 316 es resistente a la corrosión por picado y por rendija. Sin embargo, principalmente los que contienen entre 8 y 10% de níquel sufren corrosión bajo tensiones (SCC). A temperatura ambiente, si el material se deforma plásticamente a temperatura ambiente, la austenita puede transformarse en martensita. En la práctica, es más utilizado el acero inoxidable 316L por su bajo contenido de carbono, inferior al 0,03%. El contenido de carbono es suficientemente bajo para reducir la precipitación de carburos intergranulares a un nivel seguro. Es muy utilizado cuando es necesario soldar el material.

En comparación, los aceros inoxidables austeníticos son más resistentes a la corrosión que los ferríticos y martensíticos, por su alto contenido de cromo. A diferencia de los aceros

ferríticos y los duplex, no presentan transición dúctil/frágil. Además, no son magnéticos como los ferríticos y martensíticos.

2.2. Titanio

El titanio y sus aleaciones son muy utilizadas por su alta ductilidad y tenacidad. Sin embargo, el titanio es muy caro porque es difícil de obtener a partir de los minerales. Se utiliza ampliamente en implantes ortopédicos y en la industria aeroespacial.

Ventajas del uso del titanio y sus aleaciones:

- Alta resistencia,
- Baja densidad,
- Excelente resistencia a la corrosión bajo numerosos medios agresivos,
- Algunas aleaciones no sufren transición dúctil-frágil,
- Presenta una transformación alotrópica de α (hcp) a β (bcc), que posibilita diversas alternativas de aumento de resistencia.

En cuanto al uso médico, el titanio es inerte en el medio fisiológico humano, resiste en forma excelente al ataque de los fluidos corporales y no causa reacciones alérgicas. Los implantes de titanio generalmente se integran al hueso, por lo que se los emplea muy a menudo en implantes dentales. La aleación más usada para estas aplicaciones es la aleación de titanio grado V (Ti-6Al-4V).

Los elementos aleantes más utilizados en aleaciones de titanio son aluminio (Al), oxígeno (O), nitrógeno (N), carbono (C), vanadio (V), molibdeno (Mo), niobio (Nb), tántalo (Ta), hierro (Fe), manganeso (Mn), cromo (Cr), níquel (Ni), cobre (Cu), silicio (Si), hidrógeno (H), zirconio (Zr) y estaño (Sn). Los aleantes se pueden clasificar en función de su efecto sobre la estabilidad de las fases del titanio α y β en: α -estabilizadores, β -isomorfos, β -eutectoides y neutros.

Existen varios estados de oxidación del titanio gracias a su elevada reactividad con el oxígeno. Generalmente, los óxidos de titanio tienen una gran estabilidad termodinámica y presentan energías libres de formación muy negativas ya que se pueden conformar en una amplia variedad de medios oxidantes. Los óxidos de titanio más relevantes son los siguientes:

- Monóxido de titanio (TiO): este óxido presenta varias formas alotrópicas. La fase más relevante es la γ y su temperatura de fusión y de evaporación, respectivamente, son 1737°C y 3660°C, mayores a las del titanio. Tiene un color dorado y es conductor.
- Sesquióxido de titanio (Ti₂O₃): presenta dos formas alotrópicas. Tiene un color violeta en ambas formas. La temperatura de fusión de la fase α es de 2127°C y de la fase β es de 1900°C. A temperatura ambiente, este óxido es semiconductor.
- Series Ti_nO_{2n-1}: abarca el rango de $n = 3 - 10$. La especie $n=3$ se puede encontrar en tres formas cristalinas monocíclicas. La anosovita (fase α) presenta un color azul oscuro y su temperatura de fusión es de 1777°C. Las fases Magnéli corresponden a los óxidos formados con un valor de n entre 4 y 10. También poseen un color azul oscuro y son semiconductores.

- Dióxido de titanio (TiO_2): Es el más utilizado por su amplia aplicación tecnológica. Se encuentra en tres fases cristalinas: la brookita (romboédrica), la anatasa y el rutilo (ambas tetragonales). Las dos primeras son fases metaestables. El rutilo es termodinámicamente muy estable. Todas las fases presentan una alta resistividad eléctrica, alta dureza y una temperatura de fusión de 1825°C . En su forma volumétrica son de color gris o blanco mate.

2.3. Electroerosión (EDM y WEDM)

La electroerosión es un proceso de mecanizado no convencional. El método de arranque de material es por medio de descargas eléctricas controladas, que saltan, en un medio dieléctrico, entre un electrodo (herramienta de trabajo) y la pieza a mecanizar. Una de las ventajas de este tipo de procesos es que puede mecanizar cualquier tipo de metal sin importar su dureza o tenacidad. Otra propiedad fundamental es su gran aptitud para realizar formas complejas, tanto pasantes como ciegas.

Se requieren corrientes pulsantes unidireccionales de elevada energía, que producen chispas hacia el material eléctricamente conductor a través del fluido dieléctrico. La duración de la chispa es muy corta, suele variar desde 1 o 2 microsegundos a 2 milisegundos, y va acompañado de un gran aumento de temperatura, que suele alcanzar hasta decenas de miles de grados centígrados. Esto supone una concentración del efecto térmico en un volumen muy reducido de material, dando como resultado la fusión e incluso evaporación de dicho volumen de material.

Al añadir a esto los efectos dinámicos de la propia descarga y del medio dieléctrico, se obtiene en la pieza un cráter de forma semiesférica, cuyo volumen depende de factores tan diversos como la energía y la duración de la descarga, la naturaleza del dieléctrico y, las propiedades físicas, la polaridad y la naturaleza del material del electrodo y de la pieza.

La separación entre el electrodo y la probeta a mecanizar se denomina gap. Esta distancia tiene influencia directa en el resultado del proceso.

Para que se produzca una corriente eléctrica es necesario que exista una cantidad de electrones libres. Es por esto que son necesarias intensidades de campo eléctrico del orden de 10^5 a 10^7 V/m. El valor puede variar respecto del metal, del estado de la superficie y de su forma física. Cuantas más aristas vivas tengan los electrodos serán más susceptibles de emitir electrones espontáneamente.

En un momento dado, se superará la tensión de disrupción del dieléctrico que separa el electrodo de la pieza, y se iniciará así la formación de un canal de elevada conductividad. Gracias a la intensidad del campo eléctrico el dieléctrico será ionizado. La intensidad de dicho campo será proporcional a la diferencia de potencial e inversamente proporcional a su separación.

De esta forma comenzará la descarga producida por efecto de la emisión de electrones inducida por el campo eléctrico y ocurrirá en el lugar de mayor proximidad entre el electrodo y la pieza (Figura 2.1). La descarga estará limitada por la duración y amplitud del impulso de corriente y por la caída de tensión entre electrodos.

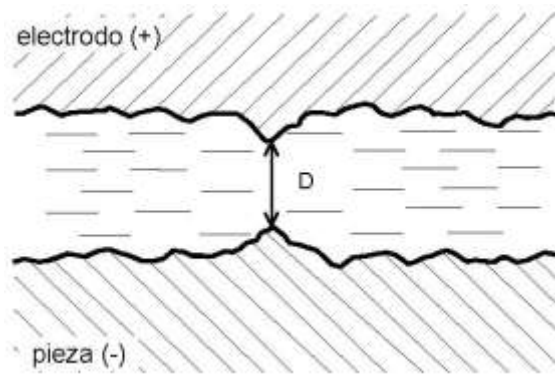


Figura 2.1. Lugar de máxima proximidad entre electrodo y pieza, polaridad directa [Camprubí Graell et al, 2007].

El punto superficial al que llega la descarga es calentado por el flujo de electricidad hasta que el material es fundido o vaporizado. Cuando deja de circular corriente el fluido se desioniza y parte del material fundido se solidifica y es arrastrado por la corriente de fluido. Las sucesivas descargas producirán una erosión en ambas superficies. La erosión producida es diferente entre el electrodo y la pieza, es importante que esto suceda ya que así el electrodo tiene un menor desgaste.

La polaridad directa es utilizada cuando el electrodo actúa como cátodo y la pieza como ánodo. Para ciertas condiciones de intensidad y tiempo de impulso es preferible cambiar la polaridad utilizada por polaridad inversa.

Además de controlar la descarga, el dieléctrico tiene otras funciones. Actúa como aislante entre el electrodo y la pieza. Al alcanzar la tensión de ruptura, se produce la circulación de corriente eléctrica sólo por el canal generado. Otra función importante es la de generar una burbuja de alta presión alrededor del canal de corriente (Figura 2.2). Cuando deja de circular corriente, la presión interna de la burbuja cae bruscamente, generando una depresión de manera que el dieléctrico arrastra el material fundido en el cráter recién formado, a la vez que enfría la superficie, impidiendo la conducción del calor hacia el interior del metal.

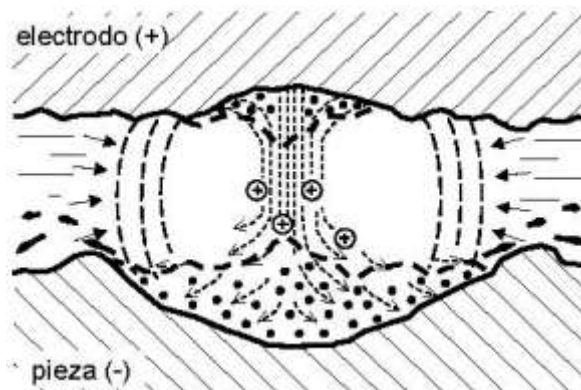


Figura 2.2. Arranque de material producido por la descarga, polaridad directa [Camprubí Graell et al, 2007].

Las características que debe reunir un líquido dieléctrico para ser empleado en este proceso son las siguientes:

- Rigidez dieléctrica para soportar campos eléctricos que crean las tensiones que se aplican al electrodo y la probeta, que están separados en un gap que oscila entre 10 y 2500 μm .
- Baja viscosidad y baja tensión superficial, con la finalidad de penetrar fácilmente dentro del gap y reconstruir las condiciones normales de aislamiento.
- Químicamente neutros, con la finalidad de no atacar los materiales de la pieza y el electrodo.
- Volatilidad baja.
- Punto de inflamación alto para evitar el peligro de incendio.
- Baja toxicidad
- Características térmicas adecuadas para enfriar las superficies erosionadas.
- Mínima formación de lodos (residuos).
- Conservar sus propiedades en todas las condiciones de mecanizado.
- Bajo costo y fácil obtención en el mercado.

En la mayoría de máquinas modernas la forma de los impulsos de corriente aplicada a los electrodos es rectangular. Cuando se inicia la ionización se presentan retrasos de forma aleatoria. Una forma de disminuirlos es aumentando la tensión o disminuyendo el GAP.

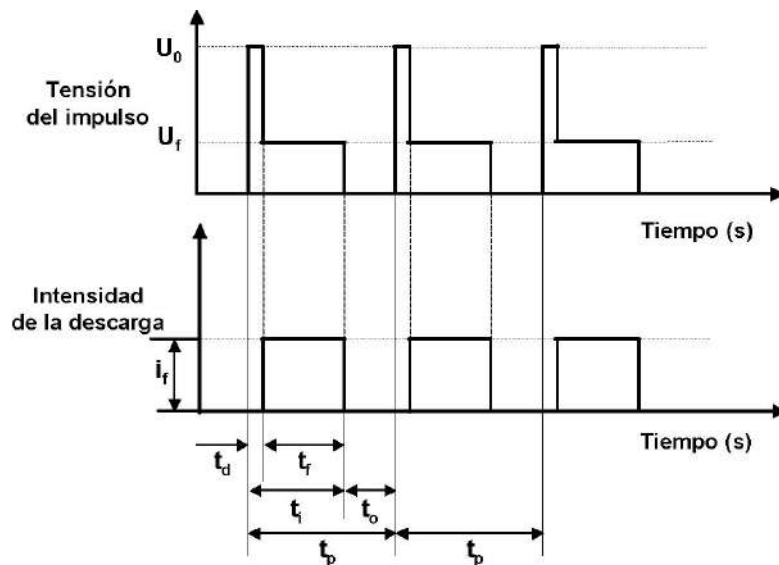


Figura 2.3. Gráfico de los impulsos de tensión y de intensidad.

La Figura 2.3 muestra un impulso de tensión y otro de intensidad en un proceso normal. Entre los dos polos (electrodo y pieza) se establece una tensión (U_0) llamada tensión de vacío. Durante un tiempo muy corto (t_d), llamado tiempo de encendido, que oscila entre 0,5 y 2 μs , se inicia la descarga a través del líquido dieléctrico. Entonces la tensión entre los polos baja hasta un valor U_f , llamado tensión de descarga. Se crea entonces el impulso de intensidad que es de forma rectangular y de duración t_f .

La electroerosión por penetración (EDM) es la más utilizada. Se basa en el avance continuo, y servocontrolado de un electrodo que penetra en la pieza, en presencia de un líquido dieléctrico. Según la forma del electrodo y de la pieza, se pueden mecanizar formas pasantes o ciegas y geometrías complejas.

La diferencia básica entre el corte por electroerosión (WEDM) y la electroerosión por penetración (EDM) es que la forma del electrodo no influye directamente en la forma de la pieza a obtener, ya que lo único que se pretende es el realizar un corte en la pieza y no obtener una copia con la forma del electrodo. Lo que conlleva a que el costo del electrodo se reduzca considerablemente al tener una forma característica que lo hace muy asequible ya que se puede comprar en el mercado listo para la utilización.

En este tipo de electroerosión, el electrodo tiene forma de hilo (Figura 2.4). En WEDM, el movimiento relativo entre el hilo y la pieza es controlado por CNC. El hilo es de diámetro pequeño, normalmente de 0,25 o 0,3 mm., aunque los diámetros pueden reducirse hasta valores de 0,025 mm. en aplicaciones de micromecánica.

En este tipo de electroerosión, el líquido dieléctrico habitualmente utilizado es agua desionizada, aunque también existen máquinas que funcionan con aceite.

Las piezas mecanizadas por WEDM poseen únicamente geometrías pasantes. Así mismo, es posible realizar cortes cónicos mediante una desalineación, controlada por el CNC, de la guía superior con respecto a la guía inferior. De este modo se pueden realizar formas con cortes cónicos que pueden ser de gran complejidad.

Una de las ventajas de la electroerosión por hilo es la rapidez ya que no es necesario mecanizar el electrodo. Otra ventaja es que el desgaste del hilo no influye sobre la precisión de las piezas en las máquinas que descartan el hilo al utilizarlo, al estar el hilo animado de un movimiento de desplazamiento que permite que la zona ya desgastada vaya reponiéndose en modo continuo. Sin embargo, hay máquinas que enrollan el hilo en un sentido y en el otro. Se reemplaza el electrodo cuando está gastado.

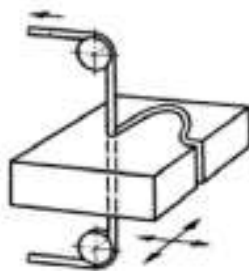


Figura 2.4. Corte por electroerosión por hilo [Camprubí Graell et al, 2007].

2.4. Electropulido

El electropulido es un proceso electroquímico que se lleva a cabo dentro de una celda electrolítica, como se observa en la Figura 2.5, conectada a una fuente de potencia, empleando un arreglo de dos electrodos a temperatura controlada, en el que el ánodo es la

pieza a electropulir y el cátodo por lo general es de acero inoxidable, grafito, platino o de la misma naturaleza que el ánodo.

Durante el ensayo, al aplicar la corriente a la superficie de la pieza (ánodo), esta se empieza a oxidar y disolver en el electrolito, mientras que en el cátodo ocurren las reacciones de reducción, que generalmente favorecen la formación de gases. El resultado es una superficie con menor rugosidad en comparación con la original. Eligiendo correctamente las condiciones de ensayo y de la superficie de partida, se puede lograr una superficie con acabado espejo. Las variables de operación que más influyen en el acabado superficial son: el estímulo aplicado (corriente/voltaje), temperatura, tiempo y composición del baño electrolítico.

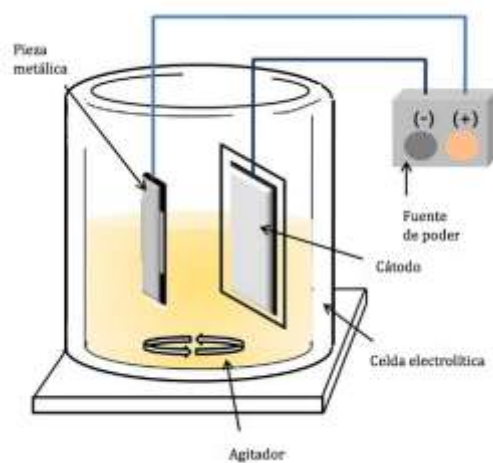


Figura 2.5. Esquema del diseño de una celda de electropulido [Espriú Pérez et al, 2020].

El proceso de electropulido es empleado en distintas aplicaciones industriales debido a su sencillez y fácil implementación industrial. Algunos ejemplos son los dispositivos quirúrgicos, componentes para ultra-alto-vacío, componentes aeroespaciales, entre otros. A diferencia del pulido mecánico, el electropulido no favorece la presencia de tensiones residuales en el material y no causa deformaciones en las piezas. Tampoco se somete la pieza a tensiones térmicas.

Sin embargo, las desventajas que presenta es que se necesita una persona especializada para la adecuación del proceso, además, las condiciones de operación, junto con los electrolitos empleados, favorecen la formación de vapores ácidos que generan una menor eficiencia en la corriente, pueden irritar las vías respiratorias de los operarios y pueden llegar a corroer las estructuras metálicas donde se lleva a cabo el proceso. Además, la superficie a ensayar puede llegar a presentar picado si no se utilizan parámetros de procesamiento adecuados.

Relación entre la tensión y la densidad de corriente

Para determinar los valores de tensión (o corriente) a aplicar, se debe analizar la curva de polarización del material en estudio frente al correspondiente electrolito. En electrolitos que contienen agua por lo general se observan tres zonas, las cuales se muestran en la Figura 2.6, correspondiente a una curva de polarización teórica. Las tres zonas son: una zona activa (V_a - V_b), en la cual la densidad de corriente aumenta exponencialmente; una zona pasiva (V_b - V_c), en la cual la corriente disminuye rotundamente y se mantiene constante; y, por último, una zona transpasiva (superior a V_c), en donde nuevamente comienza a aumentar exponencialmente la corriente a medida que aumenta el potencial.

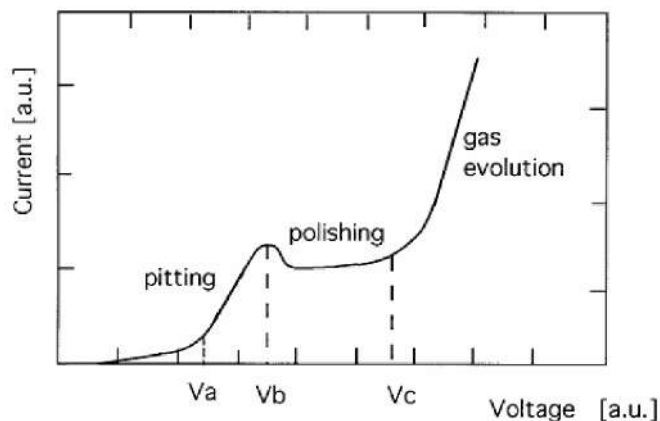


Figura 2.6. Curva de polarización teórica [Carro et al, 2019].

Por lo tanto, para realizar el electropulido, se puede trabajar tanto en la zona de pasividad como en la zona de transpasividad, siempre y cuando se eviten voltajes cercanos al potencial de evolución de oxígeno (V_c) [Palmieri et al, 2003]. Trabajar en la zona transpasivada tiene la ventaja adicional de proveer mayores densidades de corriente, aumentando de este modo la tasa de remoción de material.

Influencia de la temperatura del electrolito

Un aumento de la temperatura produce un aumento exponencial de la corriente límite (Figura 2.7). Esto se traduce en un corrimiento de las curvas tensión vs. densidad de corriente hacia valores de corrientes mayores. Este comportamiento se evidencia en la Figura 2.7, para el electropulido de un acero T11 en una solución de ácido perclórico al 7,8% [Hahn et al, 1988]. Sin embargo, se debe tener en cuenta que la viscosidad del baño electrolítico disminuye cuando se eleva la temperatura, lo que puede dificultar el proceso de electropulido.

En algunos casos, durante el proceso de electropulido, la temperatura del electrolito aumenta. Se puede deber a la presencia de capas viscosas de alta resistencia en el ánodo o a la variación de resistencia de la solución. Para mitigar el inconveniente, se puede

aumentar el volumen del electrolito, agitarlo para reducir su gradiente y/o enfriarlo utilizando algún medio externo.

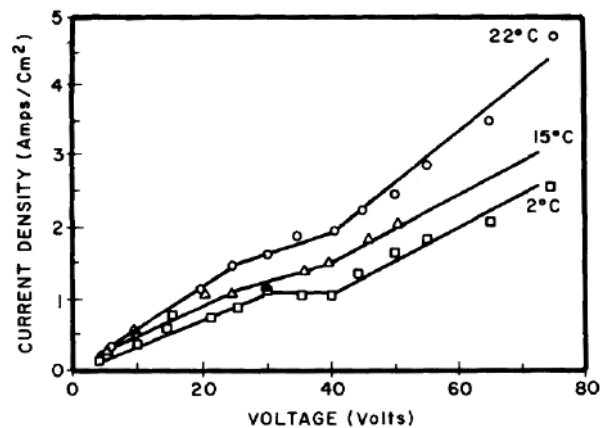


Figura 2.7. Efecto de la temperatura en las curvas tensión vs. densidad de corriente para el electropulido de un acero T11 en una solución de ácido perclórico al 7,8% [Hahn et al, 1988].

Influencia de la agitación

Durante la electrólisis, bajo condiciones de estado estable, los productos de la reacción se acumulan alrededor de los electrodos. En algunos casos, es necesario agitar la solución para remover algunos de los productos de la reacción porque la difusión y la convección no logran suministrar suficiente electrolito fresco al ánodo. En caso contrario, la reacción puede quedar estancada ya que la densidad de corriente aumenta a igual valor de tensión. A su vez, se logra acortar la duración del electropulido, siendo que la agitación aumenta la velocidad del proceso. Sin embargo, se debe evitar que la agitación sea excesiva y que adquiera turbulencia ya que esto puede conducir a la destrucción completa de la capa viscosa, generando que la eliminación de material superficial se realice de forma irregular y, en consecuencia, que la rugosidad aumente. Además, la agitación evita el calentamiento local que se genera por el paso de la corriente.

Influencia de la tensión aplicada

La tensión aplicada en el proceso de electropulido, al igual que el nivel de agitación y la temperatura, debe ser cuidadosamente seleccionada para obtener la máxima tasa de remoción de material sin comprometer la integridad superficial. Generalmente, un aumento en la tensión aplicada conlleva a un aumento en la densidad de corriente y una mayor tasa de remoción. Sin embargo, un exceso de tensión podría resultar en picado de la superficie de la pieza a electropulir.

Como se observó en la Figura 2.6, la zona más recomendada para realizar el proceso es la pasiva donde la corriente resulta ser independiente a la tensión. Sin embargo, para disminuir los tiempos, se puede trabajar en la zona transpasivada donde la corriente crece

exponencialmente con respecto a la tensión aplicada. Se debe evitar utilizar valores cercanos al potencial de evolución de oxígeno.

Influencia del tiempo de electropulido

El tiempo necesario de electropulido varía dependiendo del material, la rugosidad inicial, la densidad de corriente y el electrolito. Para las mismas condiciones de ensayo, una superficie inicial menos rugosa tendrá buenos resultados en menos tiempo que otra con mayor rugosidad de partida. Además, se ha encontrado una relación inversamente proporcional entre el tiempo y la corriente utilizada en el proceso. Es decir que al usar una densidad de corriente mayor, la superficie se pulirá en menos tiempo.

Influencia de las características del electrolito

En el proceso de electropulido, se pueden usar mezclas orgánicas, inorgánicas u orgánicas/inorgánicas. Los electrolitos más desarrollados están destinados al electropulido de acero inoxidable, los cuales contienen, generalmente, entre 50% y 75% en peso de ácido, 5% y 15% en peso de agua destilada y el resto uno o más inhibidores. Los ácidos más usados son el ácido fosfórico y el ácido sulfúrico en una proporción 1:1 o 2:1. La función principal de un electrolito es la de actuar como transportador de calor, corriente y productos de la reacción.

La forma de la curva de tensión vs. densidad de corriente depende de la composición del electrolito. En algunos casos, un aumento de contenido de ácido produce un corrimiento de la curva hacia valores de corriente mayores, como se muestra en la Figura 2.8 para el electropulido de un acero T11 en una solución de ácido perclórico.

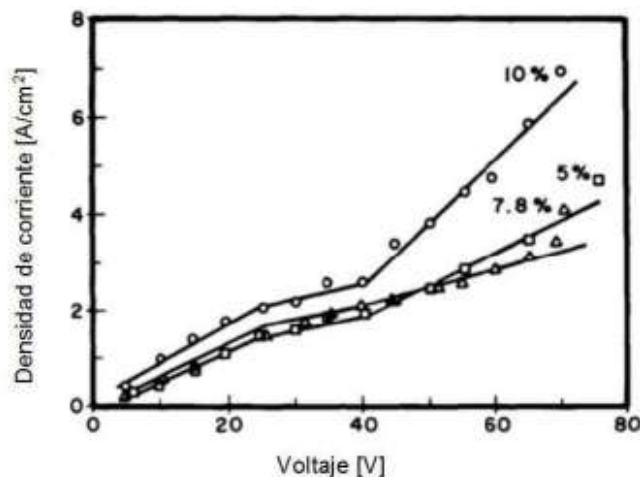


Figura 2.8. Relación densidad de corriente-voltaje para soluciones con 10%, 7.8% y 5% de ácido perclórico a 22°C por 15 segundos [Hahn et al, 1988].

2.5. Integridad superficial

Rugosidad superficial

Las superficies reales presentan particularidades que son una marca del método empleado para su obtención, por ejemplo: torneado, fresado, rectificado, bruñido, lapidado, etc. Las superficies así producidas presentan conjuntos de irregularidades, de espaciamiento regular o irregular, que tienden a formar un patrón o textura característica en su extensión. En esta textura superficial se distinguen dos componentes: rugosidad y ondulación.

La rugosidad o textura primaria, está formada por surcos o marcas dejadas por los agentes que atacan la superficie en el proceso de mecanizado (herramienta, partículas abrasivas, acción química, etc.) y se encuentra superpuesta al perfil de ondulación. Los espacios entre crestas varían entre 4 y 50 veces la profundidad de la depresión.

La ondulación o textura secundaria es el conjunto de irregularidades repetidas en ondas de paso mucho mayor que la amplitud y que pueden ocurrir por diferencia en los movimientos de la máquina-herramienta, deformación por tratamiento térmico, tensiones residuales de forja o fundición, etc. Los espaciamientos entre las ondas (compresiones de ondulación) pueden ser de 100 a 1000 veces su amplitud.

Para estudiar y crear sistemas de evaluación del estado de las superficies se hace necesario definir previamente diversos conceptos que permiten crear un lenguaje apropiado, así tenemos:

- Superficie ideal o geométrica: Es, por definición, una superficie sin errores, perfectamente plana.
- Superficie real: Es la superficie que limita a la pieza y la separa del medio ambiente.
- Perfil ideal: Perfil resultante del corte de una superficie ideal por un plano perpendicular a la misma.
- Perfil real: Es el perfil resultante de cortar una superficie real por un plano perpendicular a la superficie ideal. Limita la sección material y la separa del medio ambiente.

La Figura 2.9 muestra las superficies y perfiles definidos.

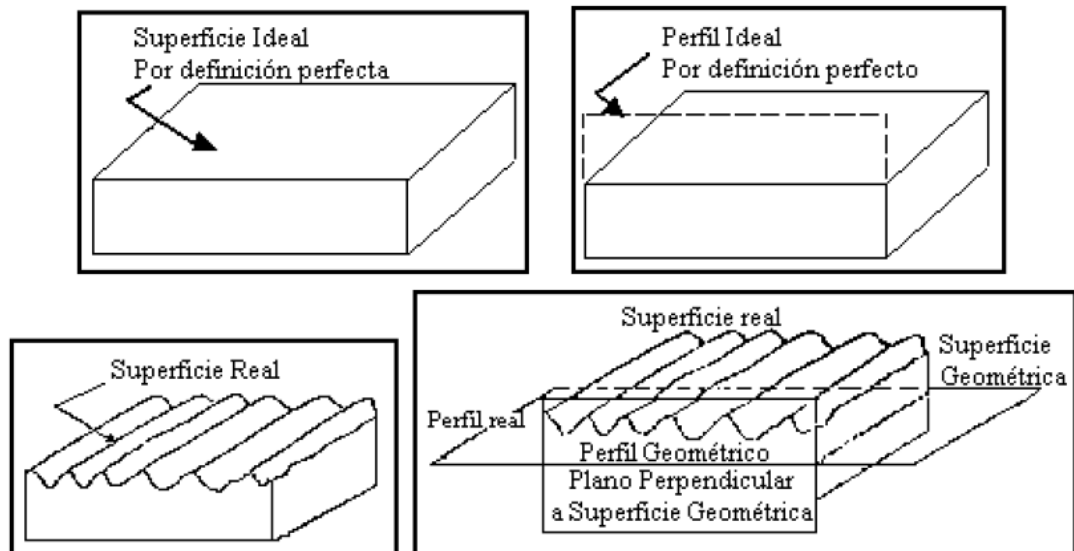


Figura 2.9. Conceptos para definir el perfil de rugosidad [Cátedra de Metrología et al, 2016].

Tanto la rugosidad como la ondulación se presentan simultáneamente en una superficie, lo que dificulta la medición individual de cada una de ellas.

Convencionalmente, la textura de una superficie se evalúa en base al método del perfil (perfil resultante de cortar una superficie real con un plano perpendicular a la misma). Los perfiles generalmente se miden con un instrumento de medición por contacto denominado perfilómetro o rugosímetro [Cátedra de Metrología, 2016].

El perfilómetro de contacto es un equipo que permite la medición de la rugosidad a través de palpadores de aguja. Consideran un trecho inicial y otro final en la carrera total de palpado, cuya finalidad es la de permitir el amortiguamiento de las oscilaciones del sistema, en especial las oscilaciones iniciales. Están compuestos por:

- Aguja: Copia la forma del perfil durante el movimiento axial. Es de diamante para que el desgaste sea mínimo.
- Patín: Se apoya sobre la superficie y funciona como filtro mecánico. Para que la deformación sea baja, es de rubí sintético.
- Captador: Registra los movimientos verticales de la aguja.
- Motor: Posibilita el movimiento del eje horizontal para realizar la lectura.
- Electrónica: Registra los movimientos captados, procesa los datos y obtiene los parámetros deseados.
- Software: Procesa los datos tomados por el equipo. Software utilizado: Talyprof.
- Soporte informático: Computadora para posibilitar la interacción entre el software y el usuario.

En el método del perfil, el elemento palpador recorre una determinada longitud de la superficie, copiando con la aguja la forma de la superficie a medir. El elemento palpador genera un perfil primario (P) que es una imagen aproximada de un perfil real. Este perfil depende de características geométricas y físicas del instrumento usado. El perfil generado

estará suavizado con respecto al perfil real y tendrá deformaciones causadas por imprecisiones en el elemento de medición y el método utilizado.

A su vez, en el perfil primario se encuentran superpuestos los dos componentes de la textura superficial definidos previamente, la rugosidad y la ondulación (Figura 2.10), por lo que se deben aplicar determinados filtros para obtener valores representativos para ambos componentes [Cátedra de Metrología, 2016], [González González, 1995].

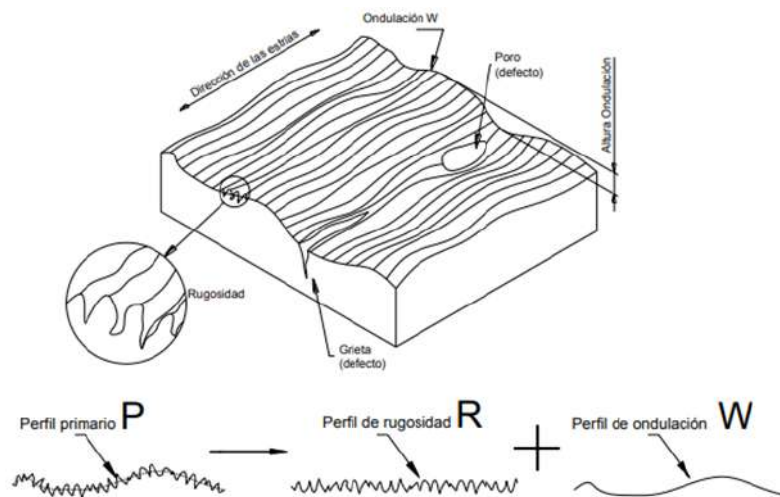


Figura 2.10. Perfiles de rugosidad (R) y ondulación (W).

Los softwares más utilizados para la medición de rugosidad emplean filtros gaussianos e ISO para separar los perfiles de ondulación y rugosidad. Estos se basan en la subdivisión del perfil primario en armónicos (Fourier) y la aplicación de un coeficiente de transmisión a cada armónico [Olympus Corporation, 2018].

El perfil de rugosidad (R) se obtiene del perfil primario al suprimir las componentes de gran longitud de onda (baja frecuencia) aplicando la longitud de corte l_c , eliminando de esta manera la ondulación. Por otro lado, el perfil de ondulación (W) se obtiene al suprimir las componentes de pequeña longitud de onda (alta frecuencia), también mediante la longitud de corte l_c .

La longitud de corte l_c (o λ_c) se denomina módulo de medición o cut-off y se corresponde con la longitud de onda utilizada para separar los perfiles de rugosidad y ondulación. Si se emplea un módulo demasiado pequeño, el mismo no será representativo de la superficie, dando perfiles de rugosidad muy atenuados. Si, en caso contrario, el valor del módulo de medición es muy grande, el perfil de ondulación resultará muy atenuado afectando también los resultados de medición de rugosidad, cuyos parámetros resultarán mayores a los reales.

Por este motivo, existen valores del módulo de medición recomendados según el proceso de acabado y la rugosidad esperada de la superficie en análisis, para obtener resultados

representativos. Los valores recomendados están tabulados en las normas DIN EN ISO 4288 y DIN EN ISO 3274 [Mitutoyo America Corporation, 2016].

Para la medición de los parámetros de rugosidad a partir de un perfil de rugosidad, generalmente se utiliza el sistema de la línea media. En el sistema de medición de la línea media, la línea de referencia se define como la línea localizada en la parte media del perfil de rugosidad, con la misma forma que el perfil geométrico ideal, dispuesta paralela a la dirección general del perfil, dentro de los límites comprendidos como base de medición, de modo que la suma de las áreas encerradas por encima de ella sea exactamente igual a la suma de las áreas encerradas por debajo.

Principales parámetros de rugosidad y ondulación

Ra - Rugosidad media aritmética: Está definido como la media aritmética de los valores absolutos de las coordenadas de los puntos del perfil de rugosidad en relación a la Línea Media dentro de la longitud de medición (Figura 2.11).

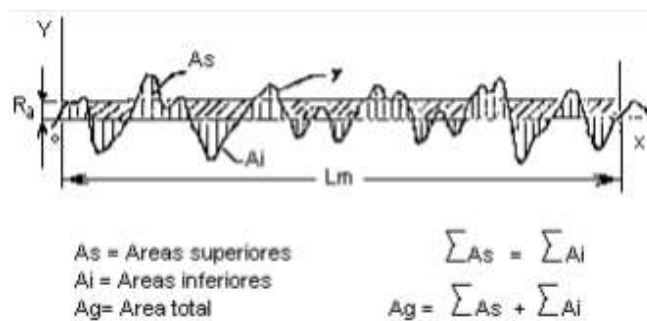


Figura 2.11. Representación del parámetro Ra [Cátedra de Metrología et al, 2016].

Esta medida puede ser definida también como la altura de un rectángulo cuya área sea igual a la suma absoluta de las áreas delimitadas entre el perfil de rugosidad y la Línea Media, siendo la longitud de medición L_m . Se puede calcular Ra mediante la siguiente expresión.

$$Ra = \frac{1}{L_m} \int_0^{L_m} |y| dx$$

Las ventajas del parámetro Ra son las siguientes:

- Es el parámetro más utilizado en todo el mundo y es aplicable a la mayoría de procesos de fabricación.
- La mayoría de los equipos de medición presentan este parámetro.
- Las marcas inherentes al proceso de mecanizado no alteran significativamente su valor.
- Generalmente, el valor de Ra da un buen parámetro estadístico que caracteriza la distribución de amplitud.

Se pueden mencionar, también, algunas desventajas del parámetro de Ra:

- Un pico o un valle no típico en una superficie va a alterar el valor de la medida, dando un valor no representativo del valor medio de rugosidad.
- El parámetro no define la forma de la irregularidad de un perfil.
- No hay distinción entre picos y valles.
- Para perfiles con una diferencia muy alta entre picos y valles, el parámetro no es el adecuado.

Rt - Profundidad total de la rugosidad: Es la distancia vertical entre el pico más alto y el valle más profundo dentro de la longitud de medición (Figura 2.12).

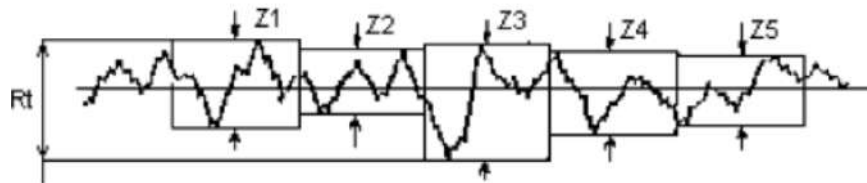


Figura 2.12. Representación del parámetro Rt [Cátedra de Metrología et al, 2016].

Las ventajas del parámetro Rt son:

- Considera toda la longitud de evaluación.
- Es fácil de obtener.

Las desventajas son:

- La rigidez de evaluación puede llevar a resultados engañosos.
- Es poco utilizado fuera de Alemania.
- No todos los equipos contienen este parámetro y para medirlo a través del gráfico es preciso tener certeza de que el perfil registrado es un perfil de rugosidad.
- Puede dar una imagen errónea de la superficie, ya que evalúa errores que muchas veces no representan la superficie en su totalidad.
- Individualmente no presenta información suficiente respecto de una superficie, es decir, no da información sobre su forma.

Wt - Altura total del perfil de ondulación: Es la distancia vertical entre el pico más alto y el valle más profundo del perfil de ondulación dentro de la longitud de medición. Presenta las mismas ventajas y desventajas que el parámetro de rugosidad Rt.

Dureza superficial

La dureza, que como término no puede definirse de manera precisa porque depende del contexto, representa la resistencia a los rayones o a la indentación y da una medida cualitativa de la resistencia del material. El ensayo de dureza mide la resistencia a la penetración de un material por un objeto duro. Se han diseñado diversos ensayos de dureza, los más utilizados son Rockwell, Brinell y Vickers. Sin embargo, para la medición de dureza superficial, el ensayo más utilizado es Knoop.

El ensayo Knoop utiliza un indentador de diamante con forma piramidal alargada. La relación entre la diagonal mayor y la diagonal menor es de 30. Mientras que la relación entre la diagonal mayor y la profundidad de la impronta es de 7. La dureza Knoop se calcula midiendo ópticamente la longitud de la diagonal larga de la penetración. Se utilizan cargas menores a 1 kg. En la Figura 2.13, se muestra como es la indentación generada sobre la superficie.

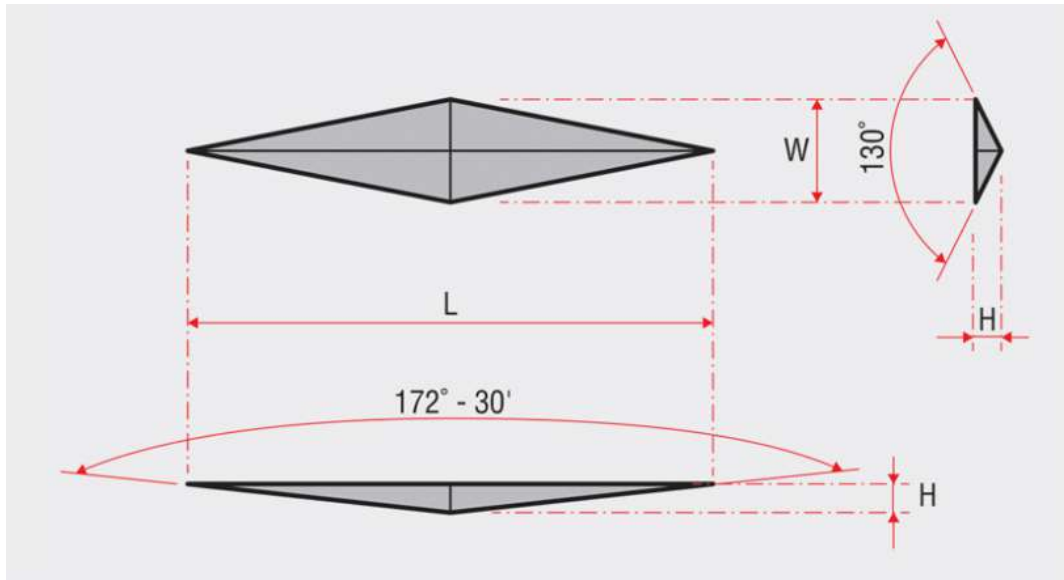


Figura 2.13. Croquis de indentación generada en el ensayo de dureza Knoop [Struers].

Las ventajas de la medición de dureza mediante el ensayo Knoop son las siguientes:

- El indentador Knoop penetra la mitad de la profundidad que el indentador Vickers. Es adecuado para materiales más frágiles y es más sensible a las condiciones superficiales.
- La diagonal a medir de la indentación es aproximadamente tres veces más larga que la diagonal generada en el ensayo Vickers. Esto minimiza los errores de medición.
- Por la forma piramidal del indentador, el ensayo de dureza Knoop puede realizar la medición de una capa fina de material por la poca profundidad de la impronta.

3. Objetivos

El objetivo general del presente trabajo es evaluar el proceso de electroerosión y electropulido sobre probetas de aleación de titanio Ti-6Al-4V y acero inoxidable 316L. Obtener indicadores claros del acabado e integridad superficial de los materiales. A partir de ello, verificar si es viable la aplicación a gran escala.

Objetivos particulares:

- Puesta a punto de ensayos y fabricación de dispositivos necesarios para su correcta realización.
- Definir las variables operativas más convenientes para realizar los ensayos de EDM, entre ellas: polaridad, tipo de dieléctrico, tipo de electrodo, rango de potencia.
- Cuantificar las alteraciones en las superficies obtenidas en las condiciones ensayadas. Caracterizar mediante imágenes, determinación de la rugosidad superficial y alteraciones en la microdureza.
- Extender este estudio a operaciones a operaciones de WEDM.
- Evaluar la aplicabilidad de electropulido para mejorar las superficies o extraer residuos o productos indeseados generados en la electroerosión.
- Determinar la ventana de procesamiento para un determinado electrolito y separación de las superficies. Ensayar diferentes combinaciones de corriente, temperatura, tensión y tiempo.

4. Metodología

En este capítulo se describen las técnicas, equipos y materiales empleados durante el desarrollo de este trabajo.

4.1. Material

Se utilizaron varillas cilíndricas de 5 mm de diámetro de aleación de titanio grado V (Ti-6Al-4V) y de acero inoxidable 316L. En la Tabla 4.1, se muestra la composición química normalizada de los materiales utilizados en el trabajo. El acero inoxidable fue provisto por un proveedor local, no se pudo obtener la composición química del mismo por limitaciones en la geometría y la cantidad disponible. Un análisis empleando difracción de rayos x corroboró que la microestructura es mayormente austenítica con presencia de martensita. La barra de aleación de titanio fue utilizada con anterioridad en trabajos del área y contaba con certificación de composición química.

Grade	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
316L	≤0.03	≤1.0	≤2.0	≤0.045	≤ 0.03	12.0-15.0	16 .0-1 8.0	2.0-3.0

Composición Química %				
Ti	Al	V	N	Otros
Bal.	5.50 - 6.75	3.50 - 4.50	0.03 máx.	C 0.08 máx. O 0.20 máx. H 0.015 máx.

Tabla 4.1. Composición química de AISI 316L y aleación de titanio Ti-6Al-4V.

4.2. Probetas y electrodos

Las probetas fueron cortadas utilizando un torno paralelo del taller de Máquinas herramientas de la Facultad de Ingeniería. Se utilizó una herramienta reafilable de acero rápido al cobalto M42 y se refrigeró con agua destilada provista manualmente. Las muestras se obtuvieron con un largo 10,2 mm. Luego, se realizó un pulido manual a cada superficie generada con lijas al agua de granulometría creciente (#100, #220, #500).

En la Figura 4.1 se presenta el electrodo utilizado en la mayoría de los ensayos de EDM. El mismo consistió en una barra de cobre electrolítico de diámetro 10,1 mm y 33,2 mm de longitud. Luego de cada ensayo, se regeneró la superficie utilizada mediante torneado.



Figura 4.1. Imágenes del electrodo de cobre electrolítico empleado en EDM.

Se realizó un ensayo de electroerosión en titanio con un electrodo del mismo material que la probeta. El electrodo tenía las mismas dimensiones que las probetas ensayadas y fue obtenido del material base mencionado.

Durante los ensayos en acero inoxidable, se utilizó otro electrodo de cobre de menor tamaño para realizar el ensayo en la polaridad opuesta. No se utilizó el electrodo de cobre mencionado porque no era posible sujetarlo con el prisionero de la electroerosionadora.

En los ensayos de WEDM, las probetas fueron cortadas durante el desarrollo del ensayo. El electrodo empleado fue un alambre de molibdeno de diámetro 0,18 mm.

4.3. Construcción de dispositivos y accesorios

Los accesorios y dispositivos construidos para la realización de los ensayos de EDM y de electropulido fueron fabricados con los equipos disponibles del taller de Máquinas herramientas del departamento de Mecánica. Se utilizaron las siguientes máquinas:

- Torno paralelo
- Taladradora de banco
- Amoladora de banco
- Fresadora CNC

Los materiales utilizados para la fabricación se encontraban disponibles en el taller. Para la construcción del porta-probetas para EDM se utilizó una barra de cobre y una varilla de acero plata. Se modificó un porta-electrodo colocando una chapa de cobre con sujeción a tornillo, para estabilizar el dispositivo. Y se utilizó una barra de 20 mm de diámetro y 9 mm de espesor para realizar un porta-probetas para pulir manualmente y realizar tareas de caracterización. Para el ensayo de electropulido, se fabricó un dispositivo de APM (polietileno de alto peso molecular), con una barra de 30 mm de diámetro y otra de 15 mm de diámetro.

El desarrollo de los mismos se describe en el capítulo 5.

4.4. Preparación de muestras

Una vez pulidas las probetas, se realizó un lavado para preservar las superficies limpias y evitar la generación de óxidos. Se utilizó el método de inmersión de la probeta en alcohol etílico y agitación manual durante un minuto. El lavado se realizó cuando se terminó de pulir manualmente, después del ensayo de electroerosión y luego de la manipulación para la medición de dureza, toma de imágenes y medición de rugosidad.

4.5. Ensayos de EDM

Se realizaron ensayos de EDM en aleación de titanio Ti-6Al-4V y en acero inoxidable 316L en las condiciones de potencia máxima y mínima disponibles en la máquina electroerosionadora. Se empleó la electroerosionadora EDUCA 10 del taller de Máquinas herramienta de la Facultad de Ingeniería.

Con respecto a las condiciones de ensayo, el parámetro a variar fue la potencia. En un inicio, se realizaron los ensayos con nivel de potencia 1 y 5. Sin embargo, se solicitó la revisión de la máquina al departamento de Ingeniería Eléctrica, porque durante la pandemia no fue utilizada durante más de un año. Se observó que había una disminución de la corriente provista por la máquina, por lo que en un nivel de potencia 2 brindaba la corriente que corresponde a la potencia 1 según la especificaciones del manual. Se rehicieron los ensayos de nivel de potencia 1 en 2, para utilizar la misma densidad de corriente que la empleada en trabajos previos realizados en el área [Trabadelo y Montoya, 2018]. De esta manera, fue posible comparar los resultados. Los otros parámetros, Figura 4.2, fueron establecidos como valores de referencia en el trabajo mencionado.

TT = 6; TP = 7; GAP = 8,5; VEL = 8; SERVO \uparrow = 9; SERVO \downarrow = 3



Figura 4.2. Imagen del tablero con las condiciones de ensayo de la electroerosionadora EDUCA 10.

En la Tabla 4.2, se relacionan los niveles de potencia con la corriente entregada por la máquina, determinados mediante pinza amperométrica. Según el manual operativo, la corriente entregada en el nivel 1 es de 2 A y en el nivel 5 de 10 A. Se puede observar que la corriente disminuyó por defectos en el sistema electrónico de la máquina.

Nivel de potencia	I [A]	Area [cm ²]	Densidad de corriente [A/cm ²]
1	1,2	0,196	6,112
2	2,4	0,196	12,223
3	3,6	0,196	18,335
4	4,8	0,196	24,446
5	6	0,196	30,558

Tabla 4.2. Cálculo de la densidad de corriente de EDM en función de la corriente entregada y el área a mecanizar.

La tasa de remoción de material se determinó mediante el micrómetro instalado en el eje vertical de la electroerosionadora y el tiempo de ensayo. Se estableció el tiempo máximo de ensayo de 15 minutos y la distancia máxima a recorrer 0,2 mm. Es decir, si se removía la distancia seteada en menos tiempo del máximo, se tomaba el tiempo requerido. En lo contrario, si en el tiempo máximo no se electroerosionaba la distancia seteada, con el micrómetro se midió la distancia vertical recorrida.

Para los ensayos de EDM en probetas de aleación de titanio Ti-6Al-4V y en acero inoxidable 316L, se utilizaron diferentes variables operativas en la máquina: niveles de potencia (2 y 5), polaridad (directa e inversa), electrodos y dieléctricos (agua destilada y kerosene).

Al finalizar los ensayos, las probetas fueron identificadas escribiendo en los laterales con un minitorno portátil. El nombre se designó con la sigla del material (T para la aleación de titanio e I para el acero inoxidable) y el número de probeta. En función de la orientación de las letras, se adopta una superficie de trabajo superior e inferior siguiendo el croquis de la Figura 4.3. La superficie superior se nombra con la letra y el número (ej. T1) y la superficie inferior con la letra, el número y una tilde (ej. T1'). De este modo pudo utilizar ambos extremos de la muestra, individualizando cada una de ellas.

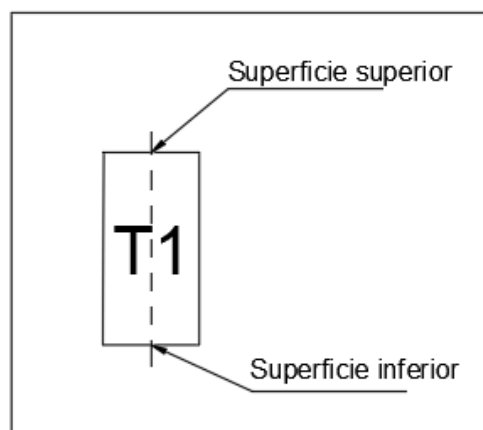


Figura 4.3. Croquis con la identificación de las probetas electroerosionadas.

En la Tabla 4.3, se muestran los ensayos realizados en ambos materiales con las respectivas condiciones de ensayo.

Nombre	Material	Proceso	Polaridad	Nivel de potencia	Dieléctrico	Electrodo
I2	316L	EDM	Directa	5	H ₂ O	Cobre electrolítico
I2'	316L	EDM	Inversa	5	H ₂ O	Cobre electrolítico
I3 - I3'	316L	EDM	Inversa	5	Kerosene	Cobre electrolítico
I4	316L	EDM	Inversa	2	Kerosene	Cobre electrolítico
T1	Ti-6Al-4V	EDM	Inversa	2	H ₂ O	Ti-6Al-4V
T2	Ti-6Al-4V	EDM	Directa	2	H ₂ O	Ti-6Al-4V
T2'	Ti-6Al-4V	EDM	Inversa	5	H ₂ O	Cobre electrolítico
T4	Ti-6Al-4V	EDM	Inversa	5	Kerosene	Cobre electrolítico
T4'	Ti-6Al-4V	EDM	Inversa	2	Kerosene	Cobre electrolítico
T5	Ti-6Al-4V	EDM	Inversa	2	H ₂ O	Cobre electrolítico

Tabla 4.3. Ensayos realizados de EDM en acero inoxidable y aleación de titanio.

4.6. Ensayos de WEDM

La realización de los ensayos de electroerosión por hilo se llevó a cabo en la empresa 8 Bloq. La máquina utilizada se identifica como Insumatric CTWG320 (Figura 4.4). Según sus especificaciones técnicas tiene una potencia máxima de 4,5 KVA, permitiendo remover hasta 180 mm²/min con una Ra de hasta 1 µm.



Figura 4.4. Imagen de la electroerosionadora por hilo de la empresa 8 Bloq.

El material de partida consistió en una varilla de acero inoxidable 316L y una varilla de Ti6Al4V, de la misma partida de material de donde se realizaron los cortes para las probetas a electroerosionar en la máquina de EDM. La sujeción mecánica se realizó mediante una brida, como se observa en la Figura 4.4. Por el método de sujeción, el eje de la varilla se colocó a $90^{\circ} \pm 1^{\circ}$ respecto a las paralelas para anclaje de piezas. El electrodo utilizado fue alambre de molibdeno de 0,18 mm de diámetro. Se utilizó el fluido dieléctrico que se muestra en la Figura 4.5, este se disuelve un 5% en agua. Se le consultó al proveedor sobre la composición química del soluble, sin embargo, no se obtuvo la información requerida.



Figura 4.5. Imagen del fluido dieléctrico usado en los ensayos de WEDM.

Las condiciones de corte precargadas en la electroerosionadora eran cinco (101, 102, 103, 104 y 105). El nivel de mayor potencia era el 102, mientras que el de menor potencia era 105. Los seteos 101 y 103 tenían similar potencia, se diferenciaban en los tiempos activos e inactivos. En la Figura 4.6, se muestra la pantalla de la máquina con las condiciones mencionadas.



Figura 4.6. Imagen de la pantalla de la electroerosionadora por hilo con las condiciones de ensayo.

Para que las condiciones de ensayo sean replicables, se tomaron los valores de corriente y tensión máximas durante los ensayos. De esta forma, es posible calcular la corriente efectiva durante un período completo, como muestra la Figura 4.7.

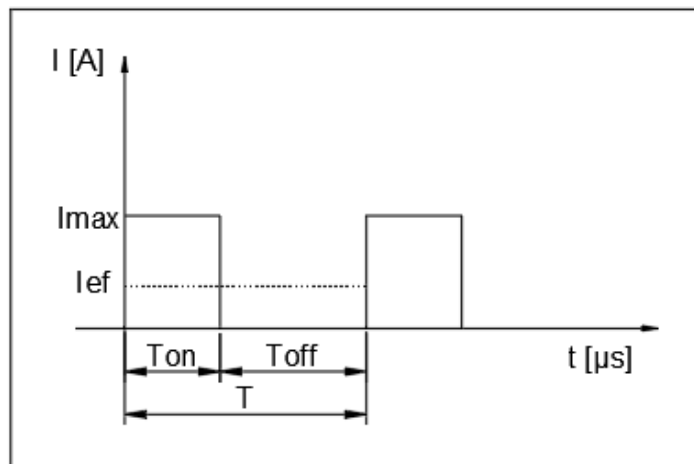


Figura 4.7. Gráfico de la corriente en función del tiempo (pulso en forma de escalón).

En la Tabla 4.4, se calculan las corrientes efectivas y potencias para cada seteo mencionado.

Parámetro	Ton [μ s]	Toff [μ s]	Período [μ s]	I [A]	V [V]	I ef [A]	P [W]
101	30	150	180	2,55	70	0,425	29,75
102	40	200	240	3,50	70	0,583	40,83
103	10	60	70	2,00	70	0,286	20,00
104	2	12	14	0,85	68	0,121	8,26
105	1	10	11	0,10	50	0,009	0,45

Tabla 4.4. Cálculo de potencia en función de la corriente, tensión y tiempos activos e inactivos para cada condición de ensayo.

Se decidió realizar dos cortes completos con cada set de parámetros en ambos materiales. Finalmente, se realizó un solo corte en la varilla de aleación de titanio con la condición 105 ya que tardó más de 5 minutos en cortar una superficie de 5 mm de diámetro. En acero inoxidable, el corte completo a nivel 105 no fue posible realizarlo, dado que solo se mecanizó 1 mm de material en 8 minutos. Se terminó el corte con un nivel de potencia 102. Por lo que, se realizaron 9 cortes en cada material.

Al realizar cortes completos, fue necesario identificar las dos superficies de las puntas de las probetas para evitar confundirlas. Por ejemplo, cuando se pasaba de 101 a 102, la superficie cortada había sido cortada con las condiciones de potencia 101 y la siguiente a cortar sería con las condiciones 102. Como las probetas son pequeñas de tamaño y caían sobre una cuba con dieléctrico, no era posible identificar qué superficie era la última cortada. Se utilizó una marca de corrector cerámico en la punta de la varilla, como se muestra en la Figura 4.8.

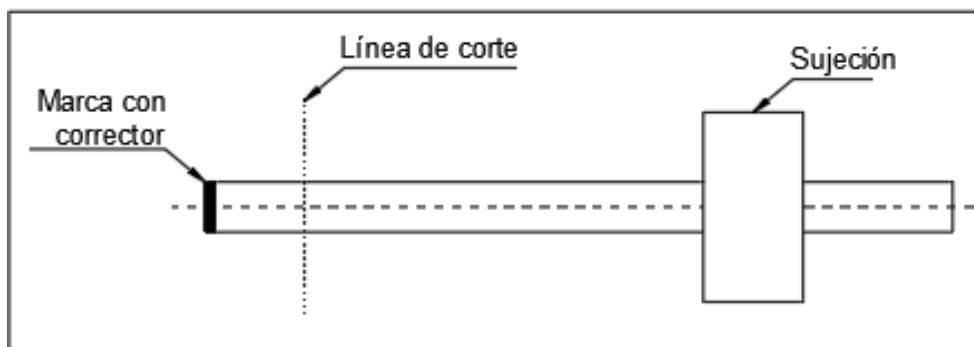


Figura 4.8. Método para identificar las superficies cortadas.

Se optó por identificar las muestras del mismo modo que en los ensayos de EDM (Figura 4.3). Sin embargo, las probetas de titanio se enumeraron del 1 al 9 y del 11 al 19 las probetas de acero inoxidable. La superficie superior sería la que está encima del número escrito y la inferior la que está debajo. La superficie superior se nombra con el número seguido de la letra “S” y la superficie inferior seguida de la letra “I”.

En la Tabla 4.5, se presentan los ensayos de WEDM realizados sobre acero inoxidable y aleación de titanio con los respectivos nombres y condiciones operativas.

Nombre	Material	Proceso	Nivel de potencia
1S-1I-2S-9I	Ti-6Al-4V	WEDM	103
2I-3S-3I-4S	Ti-6Al-4V	WEDM	104
4I-5S	Ti-6Al-4V	WEDM	105
5I-6S-6I-7S	Ti-6Al-4V	WEDM	101
7I-8S-8I-9S	Ti-6Al-4V	WEDM	102
11S-11I-12S-19I	316L	WEDM	103
12I-13S-13I-14S	316L	WEDM	104
14I-15S	316L	WEDM	105
15I-16S-16I-17S	316L	WEDM	101
17I-18S-18I-19S	316L	WEDM	102

Tabla 4.5. Ensayos de WEDM realizados en acero inoxidable y aleación de titanio con las respectivas condiciones operativas.

4.7. Ensayos de electropulido en probetas de acero inoxidable y aleación de titanio

4.7.1. Fuente de energía

Los ensayos se realizaron en el Laboratorio de metrología de la Facultad de Ingeniería. Se utilizó una fuente de tensión de corriente continua de hasta 15 A. El equipo fue facilitado por la empresa Redox Neo, Figura 4.9.



Figura 4.9. Imagen de la fuente de tensión de corriente continua usada para los ensayos de electropulido.

4.7.2. Electrolito

El electrolito, para los ensayos en acero inoxidable 316L, se seleccionó en base a un trabajo que se realizó con anterioridad en el departamento [Carro, 2019]. La composición es la siguiente:

- Ácido sulfúrico, 35%v/v
- Ácido fosfórico, 45 %v/v
- Agua, 20%v/v

Se elaboró 0,5 l de electrolito en el Laboratorio de la División Metalurgia en la Facultad de Ingeniería. El recipiente donde se realizó la mezcla se sumergió en otro más grande con hielo y se agregó más a medida que fuera necesario para bajar la temperatura de la solución (Figura 4.10). El orden en que se agregaron las sustancias fue agua, ácido fosfórico y, por último, ácido sulfúrico.

El electrolito para los ensayos en aleación de titanio se seleccionó en base a bibliografía consultada [Zhang et al, 2018]. La composición es ácido perclórico, ácido acético glacial y agua destilada en volúmenes 1:10:1,2.

Se prepararon 300 ml de electrolito en el Laboratorio de la División Metalurgia. Se utilizó la misma técnica que en la elaboración del electrolito para el acero inoxidable, un recipiente con hielo y dentro el recipiente con la solución. El orden en que se agregaron las sustancias fue agua destilada, ácido acético glacial y, por último, ácido perclórico.

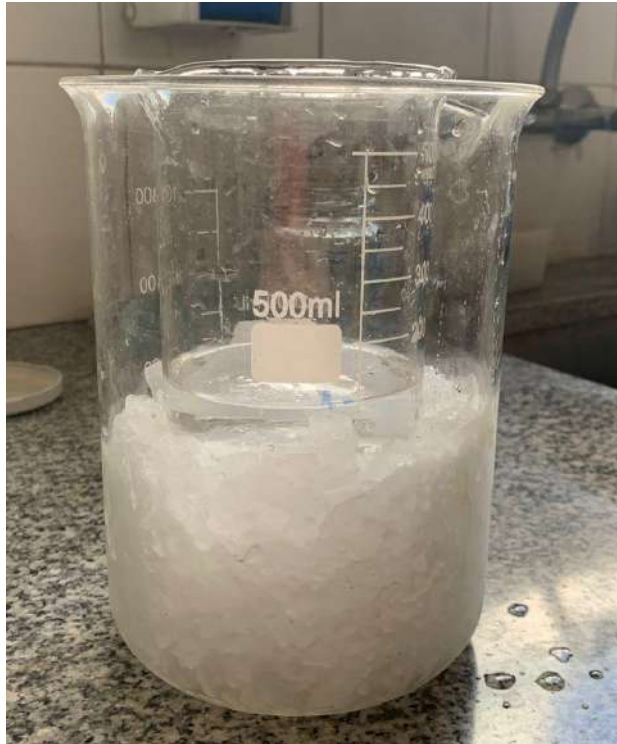


Figura 4.10. Imagen del método para la preparación del electrolito.

4.7.3. Mecanismo de agitación y medición de temperatura

En el set up del ensayo, se agregó un burbujeador para cumplir la función de agitación. Además, era necesario monitorear la temperatura del electrolito durante el ensayo. Se utilizó un termómetro digital de contacto.

4.7.4. Ánodo

Como ánodo, se utilizaron las probetas electroerosionadas por penetración y por hilo. Las probetas fueron seleccionadas por su topografía superficial y en base a los objetivos del proyecto. Se fabricó un dispositivo de grilón que permite colocar las probetas con la cara a electropulir enfrentada al cátodo.

4.7.5. Cátodo

Se utilizó como cátodo una chapa de 1,4 mm de espesor de acero inoxidable 304, de dimensiones 34 mm x 101 mm (Figura 4.11). Tiene dos agujeros de 3,5 mm de diámetro en la parte superior para la sujeción y asegurar la distancia entre ánodo y cátodo.



Figura 4.11. Imagen del cátodo de acero inoxidable 304.

4.7.6. Set up del ensayo y celda electrolítica

Como se observa en la Figura 4.12, se utilizó un frasco de vidrio para contener el electrolito. Se encuentran los elementos de medición, como es el termómetro, la pinza amperimétrica y el voltímetro. Tanto el ánodo como el cátodo, con su respectivo dispositivo de sujeción, son sostenidos por dos varillas de aluminio. Se pegó una cinta de papel en ambas varillas para asegurar la distancia entre los dos elementos y que sea la misma en todos los ensayos. El cable rojo (+) está conectado a la probeta a electropulir y el cable negro (-) está conectado a la chapa de acero inoxidable.

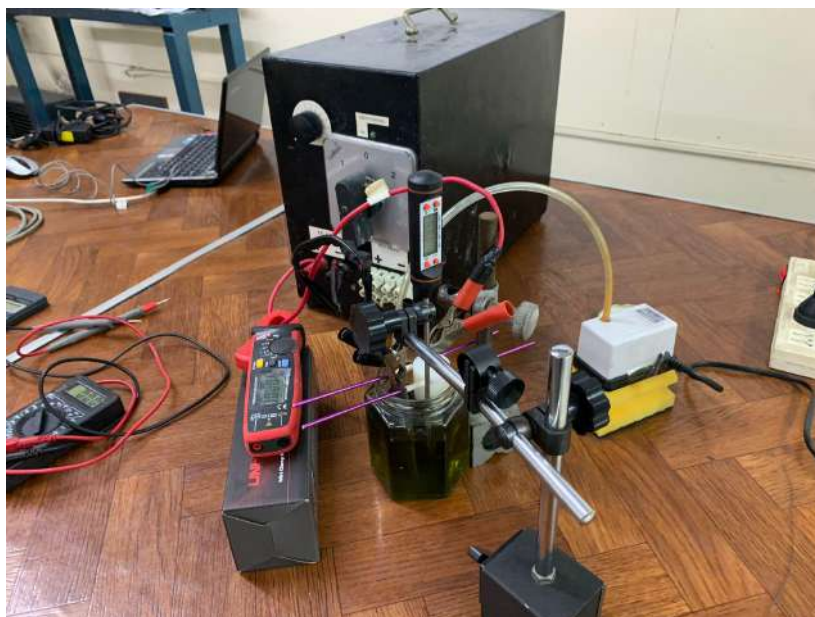


Figura 4.12. Imagen del set up del ensayo de electropulido.

4.8. Caracterización de superficies

4.8.1. Observación con microscopio

Se observaron superficies mecanizadas en diferentes microscopios, con el objetivo de relevar defectos superficiales (material redepositado, fisuras, entre otros) y analizar la integridad superficial de las muestras .

Luego de cada ensayo, se tomaron imágenes con un microscopio óptico USB portátil en bajos y altos aumentos (Figura 4.13). También, se observaron las superficies en el microscopio óptico del Laboratorio de la División Metalurgia. Sin embargo, no era posible tomar imágenes dado que no dispone de cámara. Se diseñó y fabricó en el Laboratorio de Metrología un accesorio en impresión 3D, el cual permite tomar imágenes con la cámara del teléfono celular. Algunas probetas también fueron observadas bajo el microscopio óptico del laboratorio de microscopía de INTEMA y se tomaron imágenes en diferentes aumentos (5x, 10x, 20x y 100x).



Figura 4.13. Observación de probetas con microscopio óptico USB portátil.

4.8.2. Medición de rugosidad

Se realizaron mediciones de rugosidad a todas las muestras electroerosionadas y electropulidas mediante perfilometría de contacto con el equipo Surtronic 3+ del Laboratorio de Metrología, Figura 4.14. Se seleccionó cut off de 0,8 mm y longitud de palpado de 4 mm, para lo cual la muestra debió montarse en un accesorio especial que se describe en la sección 5.1. Los resultados de rugosidad se muestran como el promedio de tres mediciones y la dispersión correspondiente. Las superficies generadas por WEDM que presentan franjas, se realizó la medición de rugosidad perpendicular a las mismas.



Figura 4.14. Imagen del método de medición de rugosidad mediante perfilometría de contacto.

La dispersión se calculó como la varianza estándar, con la siguiente expresión:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{1}^{N} (x_i - \bar{X})^2}{N}}$$

Donde x_i es el valor de una medición, \bar{X} es el promedio de los valores medidos y N es la cantidad de valores medidos.

4.8.3. Microindentación y dureza

Se utilizó el microdurómetro del Laboratorio de la División Metalurgia en la Facultad de Ingeniería (Figura 4.15). Se empleó un microindentador tipo Knoop de diamante. La impronta es de baja profundidad lo que posibilita la medición de dureza de la capa superficial de la probeta.

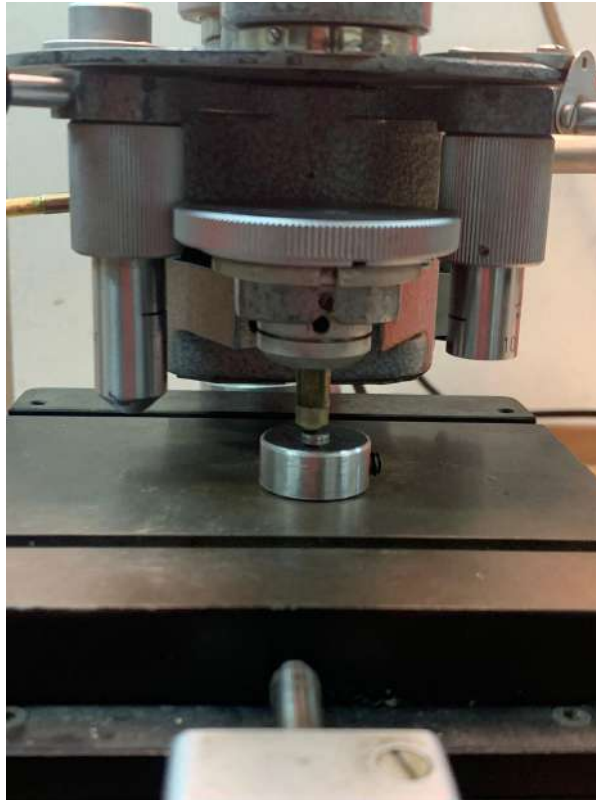


Figura 4.15. Medición de dureza Knoop mediante microdurómetro.

Durante las mediciones, se observó que la superficie era frágil por la presencia de óxidos, lo que imposibilitaba la medición de la impronta. Además, no había zonas planas con dimensiones óptimas para realizar la indentación. Se pulió levemente con lija #1200 para remover los óxidos superficiales y tomar las mediciones. Se utilizaron cargas de 200 p, 100 p y 50 p. La carga seleccionada dependió de las dimensiones de las islas pulidas que se encontraron sobre la superficie.

La dureza Knoop se calculó mediante la siguiente expresión:

$$HK = \frac{14,23 \cdot 10^3 \cdot P}{l^2}$$

Siendo P el peso en pondios y l la longitud de la diagonal mayor de la impronta en μm .

Los valores de microdureza se presentan con la dispersión calculada como la varianza estándar, igual que los datos de rugosidad.

4.8.4. Identificación de compuestos superficiales

La identificación de fases presentes en la superficie se llevó a cabo mediante difracción de rayos X (DRX) en INTEMA. Se obtuvieron los patrones de difracción correspondientes a las reflexiones de los diferentes planos de las fases cristalinas en muestras electroerosionadas y electropulidas de acero inoxidable 316L y aleación de titanio Ti-6Al-4V.

El difractómetro utilizado cuenta con una fuente de rayos X que emite Cu-K α cuya longitud de onda es de $\lambda=1,541 \text{ \AA}$. El tubo de rayos X fue operado a 40 kV y 30 mA. Se escaneo un rango angular 2θ de 30° a 100° , con incrementos de $0,05^\circ$ en intervalos de 0,05 segundos por paso.

Se aplicó la ley de Bragg para identificar las fases presentes en las superficies.

$$\lambda = 2d * \text{sen}(\theta)$$

Donde λ es la longitud de onda de la radiación aplicada, d es el espaciado interplanar y θ es el semiángulo entre los rayos incidente y difractado. Al medir los ángulos 2θ a los que se producen los picos de reflexión, se puede determinar a cuál fase corresponden. Se pueden calcular los porcentajes en volumen de las diferentes fases mediante la evaluación de las intensidades relativas.

5. Resultados

En este capítulo se mostrarán los resultados obtenidos para los objetivos planteados. En principio, se abordarán los ensayos de electroerosión (EDM y WEDM) y la caracterización y análisis de las superficies generadas. Para luego proseguir con el ensayo de electropulido, donde se presentarán las pruebas para poner a punto el sistema y el análisis de las superficies obtenidas.

5.1. Puesta a punto y desarrollo del set up para los ensayos de EDM

Para el posicionamiento de probetas en los ensayos de EDM con la máquina del taller de la Facultad de Ingeniería se intentó utilizar un accesorio que se encontraba disponible de trabajos previos. Sin embargo, luego de varias pruebas, se destinó para la sujeción del electrodo de cobre y la muestra se colocó en el husillo de la máquina.

También, se utilizó una cuba de vidrio disponible que fue empleada en trabajos previos [Trabadelo y Montoya, 2018]. Al posicionar el porta-electrodo en la cuba electrolítica, la base hexagonal no apoyaba correctamente en la base de vidrio. Se optó por realizar un agujero roscado en la base del porta-electrodo y se colocó una chapa de cobre para aumentar la superficie de apoyo.

Por la polaridad del ensayo, las probetas debían sujetarse del cabezal de la máquina. La longitud de las probetas no era suficiente para la correcta sujeción con el prisionero de cabezal. Por lo que fue necesario fabricar un porta-probetas, Figura 5.1. Además, se tuvo en cuenta la limitación del movimiento del cabezal de la máquina, es decir que era conveniente realizar un accesorio de una longitud mayor al de las probetas. En el taller, se encontró una pieza de cobre con un agujero interior pasante levemente cónico de diámetro 5 mm. Las probetas entraron a presión en el accesorio y se utilizó pegamento para asegurar la sujeción. El extremo donde se coloca la superficie a electroerosionar, se mecanizó en forma de cono para que el cobre no interfiera en el ensayo de EDM. En el otro extremo se clavó a presión una varilla de acero plata (DIN 1.2210 115CrV3) de diámetro 5 mm. Lo importante del accesorio fue asegurar el contacto eléctrico entre el cabezal y la probeta ensayada.



Figura 5.1. Imagen del porta-probetas para EDM.

Durante el ensayo, es necesario generar una corriente de fluido suficiente para arrastrar el material fundido y refrigerar la zona. Se utilizó una bomba de agua utilizada con anterioridad en trabajos del departamento.

En la Figura 5.2, se observa la disposición de los elementos usados para los ensayos de EDM.



Figura 5.2. Disposición de los elementos usados en la máquina para los ensayos EDM.

Las probetas eran muy pequeñas, por lo que fue necesario fabricar un porta-probetas para pulir las superficies, para observar las probetas en el microscopio y para medir la rugosidad superficial. Para que el dispositivo sea funcional a lo detallado fue necesario tener en cuenta las siguientes especificaciones. Primero para montar y desmontar fácilmente las probetas, se realizó un agujero interior de diámetro ligeramente mayor (ajuste deslizante) al diámetro de las probetas. Debido a este diseño, la sujeción se realizó mediante un prisionero. El diámetro exterior se seleccionó para posicionarlo cómodamente en la bandeja del microscopio. La altura debía ser ligeramente menor a la altura de la probeta para posicionarla al ras de la superficie del dispositivo cuando se requería pulir. Presentó un chaflán en los bordes de ambas caras para no lastimar al operario y evitar dañar el paño en la operación de pulido. Además, fue necesario que el eje de la muestra fuera perpendicular a la superficie de pulido. Por último, para realizar indentaciones durante el ensayo de microdureza, se requirió paralelismo entre las caras. En la Figura 5.3, se observa el croquis en 3D y el accesorio fabricado. El porta-probetas resultó de 20 mm de diámetro exterior y espesor 9 mm.



Figura 5.3. Imagen 3D del porta-probetas e imagen del dispositivo fabricado.

En la puesta a punto del sistema, se observó que al momento de montar todos los elementos del ensayo la superficie del electrodo no se encontraba paralela a la superficie de la probeta. Se supuso que el set up generaba este inconveniente. Se prosiguió a verificar la inclinación mediante un comparador, Figura 5.4, sobre el plano patrón de fundición. Primero, se realizó sin el recipiente de vidrio y luego, con el recipiente. La inclinación era inducida por el recipiente de vidrio, ya que el fondo no es plano como se suponía en un primer momento. Mediante un relevamiento de la superficie del fondo, se encontró que parte de ella presentaba una planeidad adecuada. Se utilizó corrector cerámico para marcar el lugar donde se debía poner el porta-electrodo. Para corregir el paralelismo con respecto a la base de la cuba de la electroerosionadora, se utilizó masilla plástica. Finalmente, con el comparador, se verificó que el inconveniente estuviese mitigado.

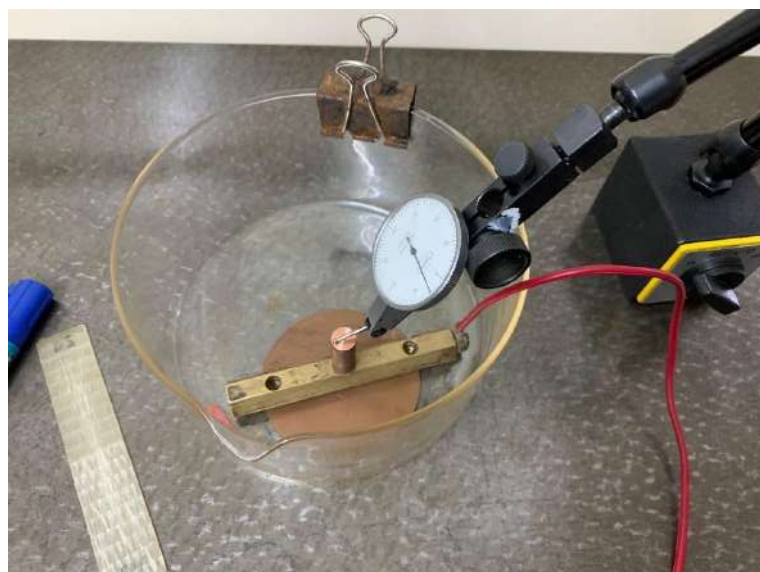


Figura 5.4. Verificación mediante comparador de la inclinación del electrodo respecto de la superficie de referencia.

5.2. Caracterización de las superficies obtenidas por EDM y WEDM

5.2.1. Imágenes obtenidas en microscopio óptico

Se tomaron imágenes en el microscopio óptico USB portátil y en el microscopio óptico del laboratorio de la División Metalurgia de las muestras electroerosionadas por hilo y de las electroerosionadas por penetración, tanto de aleación de titanio como de acero inoxidable. Las imágenes fueron tomadas para constatar la topografía superficial y completar el análisis con las mediciones de rugosidad y dureza. Además, se pudo verificar la presencia de óxidos, fisuras y material redepositado.

EDM de acero inoxidable:

Las Figuras 5.5 y 5.6 corresponden a una probeta electroerosionada con un nivel de potencia 5, en agua destilada, electrodo de cobre electrolítico y polaridad directa. La tasa de erosión de la probeta fue menor que en el cobre. A bajos aumentos, se puede observar un aro de color verdoso que corresponde a una transferencia de óxidos de cobre. La superficie se ve levemente texturada con un color más opaco que la superficie de partida. La superficie presenta un rayado correspondiente al pulido manual previo al mecanizado, es decir que no hubo una variación notable sobre la superficie.

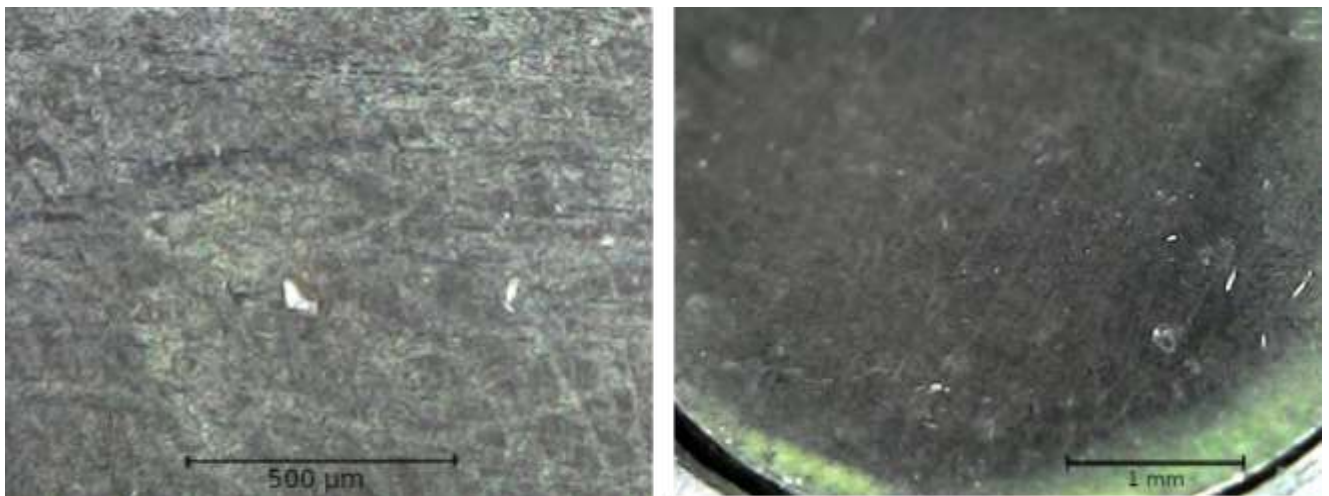


Figura 5.5. Superficie de acero inoxidable (I2) generada por EDM con nivel de potencia 5 (H₂O), polaridad directa y electrodo de cobre electrolítico. Imágenes tomadas con microscopio USB.

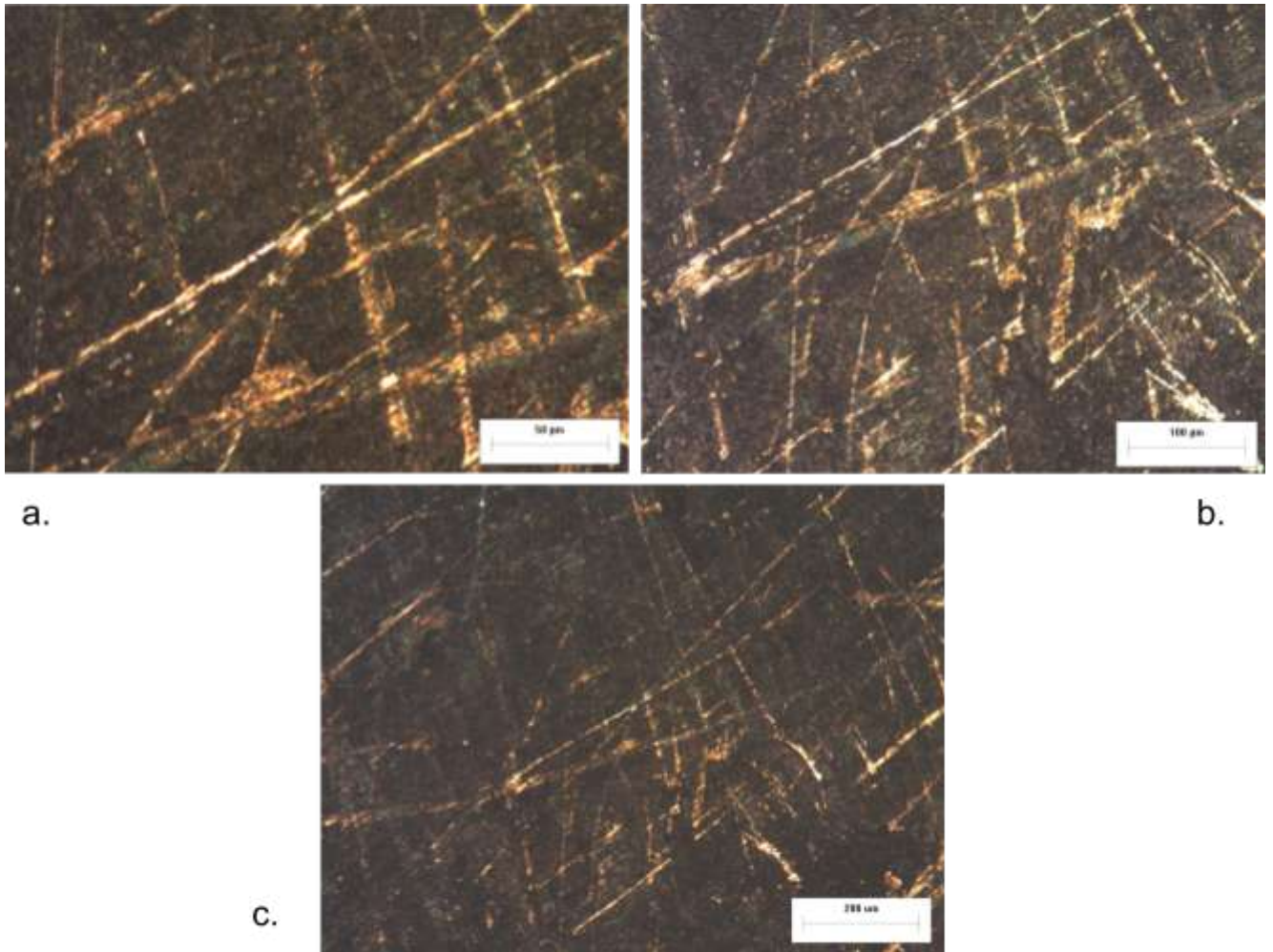


Figura 5.6. Superficie de acero inoxidable (I2) generada por EDM con nivel de potencia 5 (H_2O), polaridad directa y electrodo de cobre electrolítico. Imágenes tomadas con microscopio óptico: a. 20x. b. 10x. c. 5x.

En las Figuras 5.7 y 5.8, se muestra una superficie generada por electroerosión con un nivel de potencia 5, en agua destilada, electrodo de cobre electrolítico y polaridad inversa. La electroerosión no alcanzó a afectar toda la superficie, debido a que no se presentó paralelismo entre las caras, ya que hay zonas electroerosionadas y otras no. La superficie fue visiblemente modificada ya que copió las marcas del torneado del electrodo de cobre. En algunas zonas, la tasa de erosión fue menor a la rugosidad que presentaba el electrodo torneado, resultando en una sucesión de líneas erosionadas y zonas pulidas. En presencia de agua destilada y altas temperaturas, se generó un teñido térmico permitiendo el revelado de la microestructura.

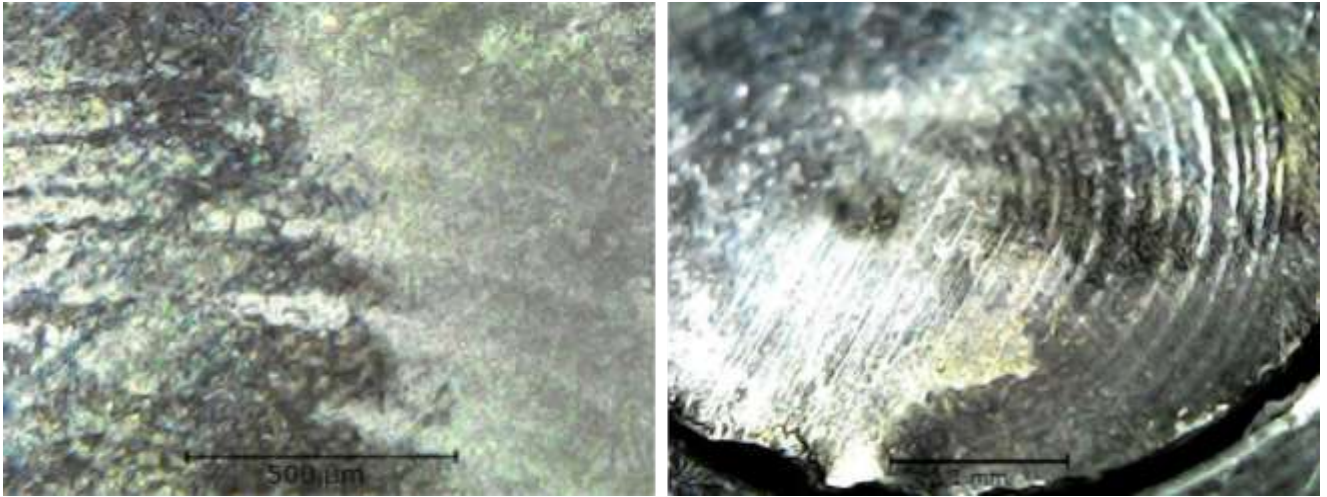
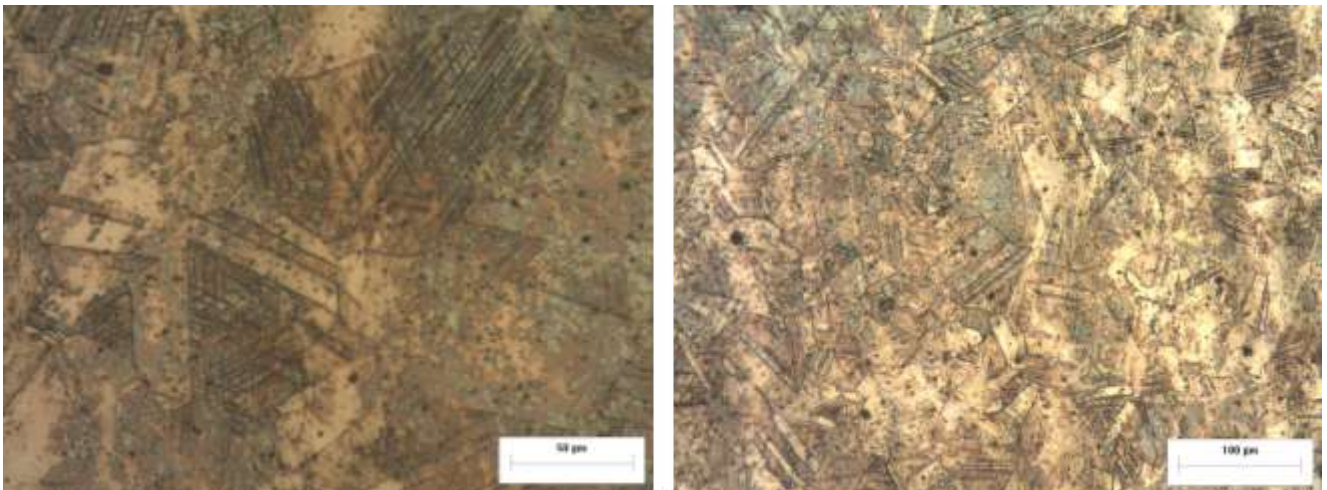
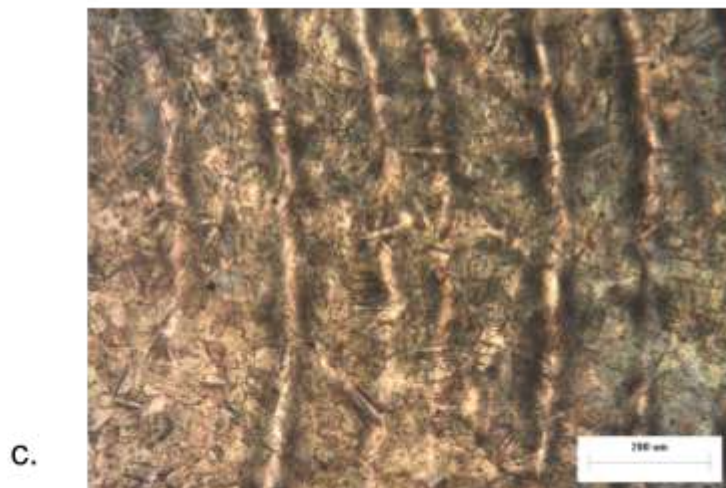


Figura 5.7. Superficie de acero inoxidable (I2') generada por EDM con nivel de potencia 5 (H₂O), polaridad inversa y electrodo de cobre electrolítico. Imágenes tomadas con microscopio USB.



a.

b.



c.

Figura 5.8. Superficie de acero inoxidable (I2') generada por EDM con nivel de potencia 5 (H₂O), polaridad inversa y electrodo de cobre electrolítico. Imágenes tomadas con microscopio óptico: a. 20x. b. 10x. c. 5x.

Se concluye que la polaridad correcta para las condiciones de ensayo mencionadas es inversa.

En el siguiente ensayo (Figuras 5.9 y 5.10), se electroerosionó una probeta con polaridad inversa, nivel de potencia 5 y se cambió el dieléctrico por kerosene. Para la misma densidad de corriente, se observa que con el kerosene el proceso es más enérgico ya que la superficie fue altamente modificada con presencia de material redepositado. Se visualizan pequeñas gotas de material resolidificado y fisuras.

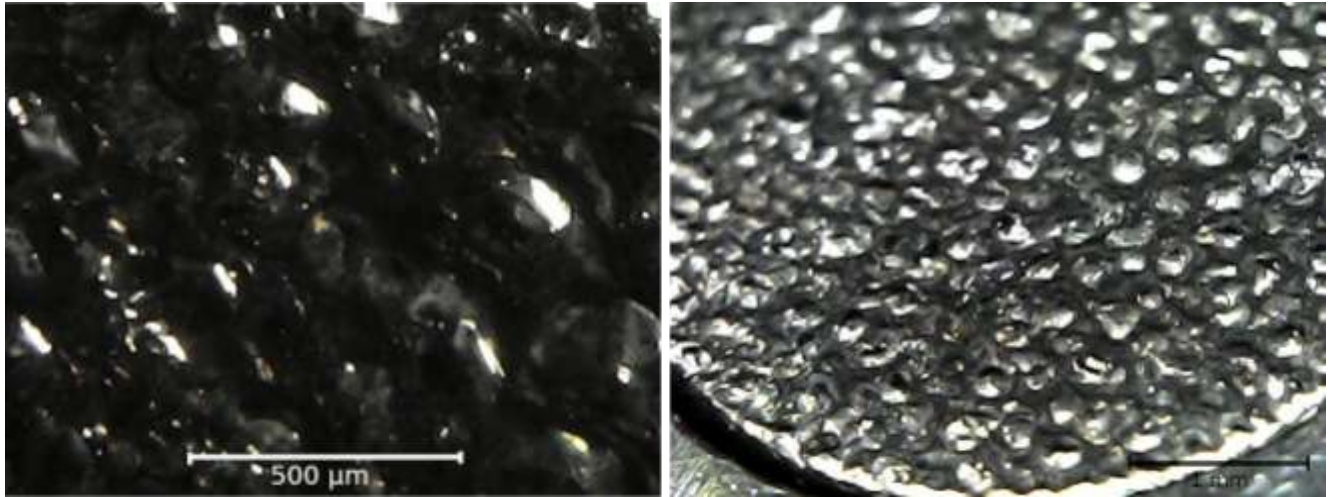


Figura 5.9. Superficie de acero inoxidable (13') generada por EDM con nivel de potencia 5 (kerosene), polaridad inversa y electrodo de cobre electrolítico. Imágenes tomadas con microscopio USB.

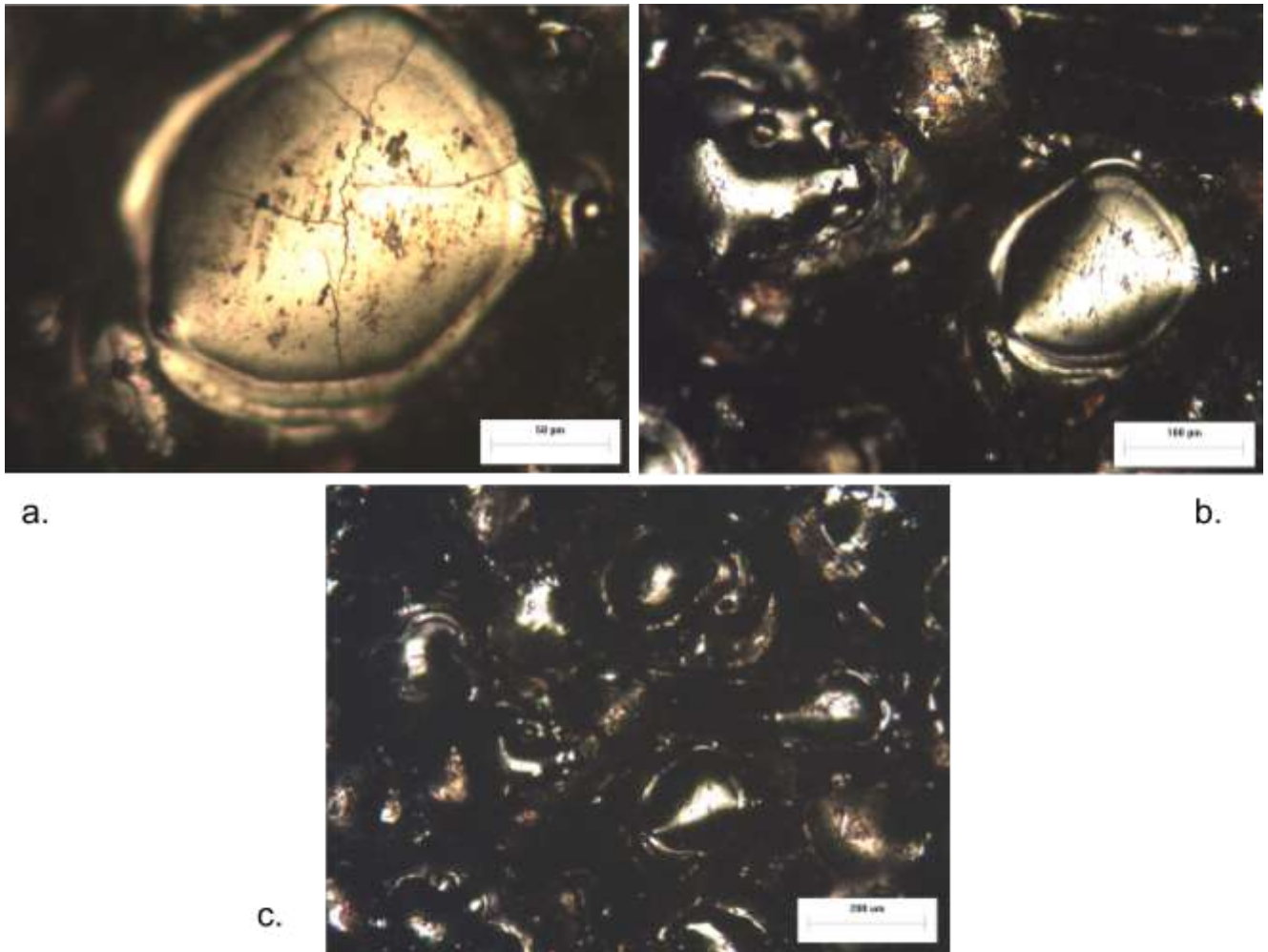


Figura 5.10. Superficie de acero inoxidable (13') generada por EDM con nivel de potencia 5 (kerosene), polaridad inversa y electrodo de cobre electrolítico. Imágenes tomadas con microscopio óptico: a. 20x. b. 10x. c. 5x.

Para el mismo tiempo de ensayo, la cantidad de material removido en este último ensayo fue mayor que cuando se empleó agua destilada. Se concluye que la tasa de remoción de material es mayor cuando se utiliza kerosene como dieléctrico para un mismo nivel de potencia. Al utilizar kerosene, se introduce la posibilidad de contaminación y formación de residuos. Durante el ensayo, el fluido se torna más oscuro y hay presencia de carbón. Se decidió cambiar el fluido finalizado cada ensayo. La superficie puede tener presencia de contaminantes no aptos para el contacto con alimentos o tejidos vivos. Por lo que se requiere una segunda etapa de fabricación, como limpieza o electropulido.

En las Figuras 5.11 y 5.12, se observa una superficie electroerosionada con polaridad inversa utilizando kerosene y nivel de potencia 2. La Figura 5.11.b, presenta un detalle de la interfaz entre la zona electroerosionada y la superficie de partida. Al igual que en el ensayo a nivel de potencia 5, hay presencia de material redepositado. Las gotas de material tienen una forma más irregular que las observadas cuando el proceso ocurre con un nivel de potencia mayor. Comparando el material redepositado, para bajo nivel de potencia las esferas son de la mitad de tamaño y el espaciado entre gotas es de la mitad

aproximadamente. También, se observa menor cantidad y tamaño de fisuras cuando se utiliza una menor densidad de corriente.

Con respecto a la tasa de remoción de material, con nivel de potencia 5, el proceso avanzó 0,07 mm en 10 minutos. En cambio, para un nivel de potencia 2, avanzó menos de 0,01 mm en 10 minutos.

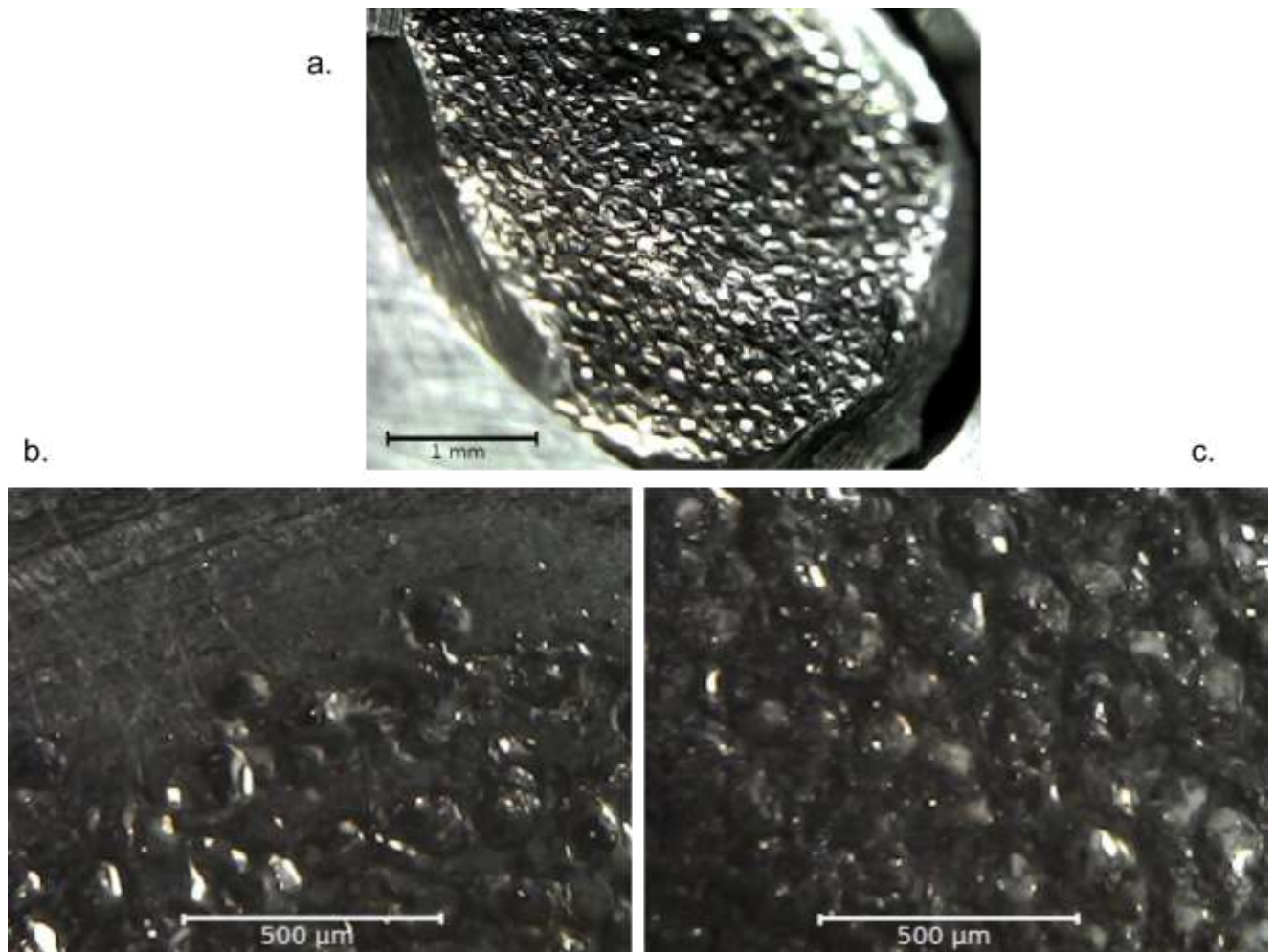


Figura 5.11. Superficie de acero inoxidable (I4) generada por EDM con nivel de potencia 2 (kerosene), polaridad inversa y electrodo de cobre electrolítico. Imágenes tomadas con microscopio USB.

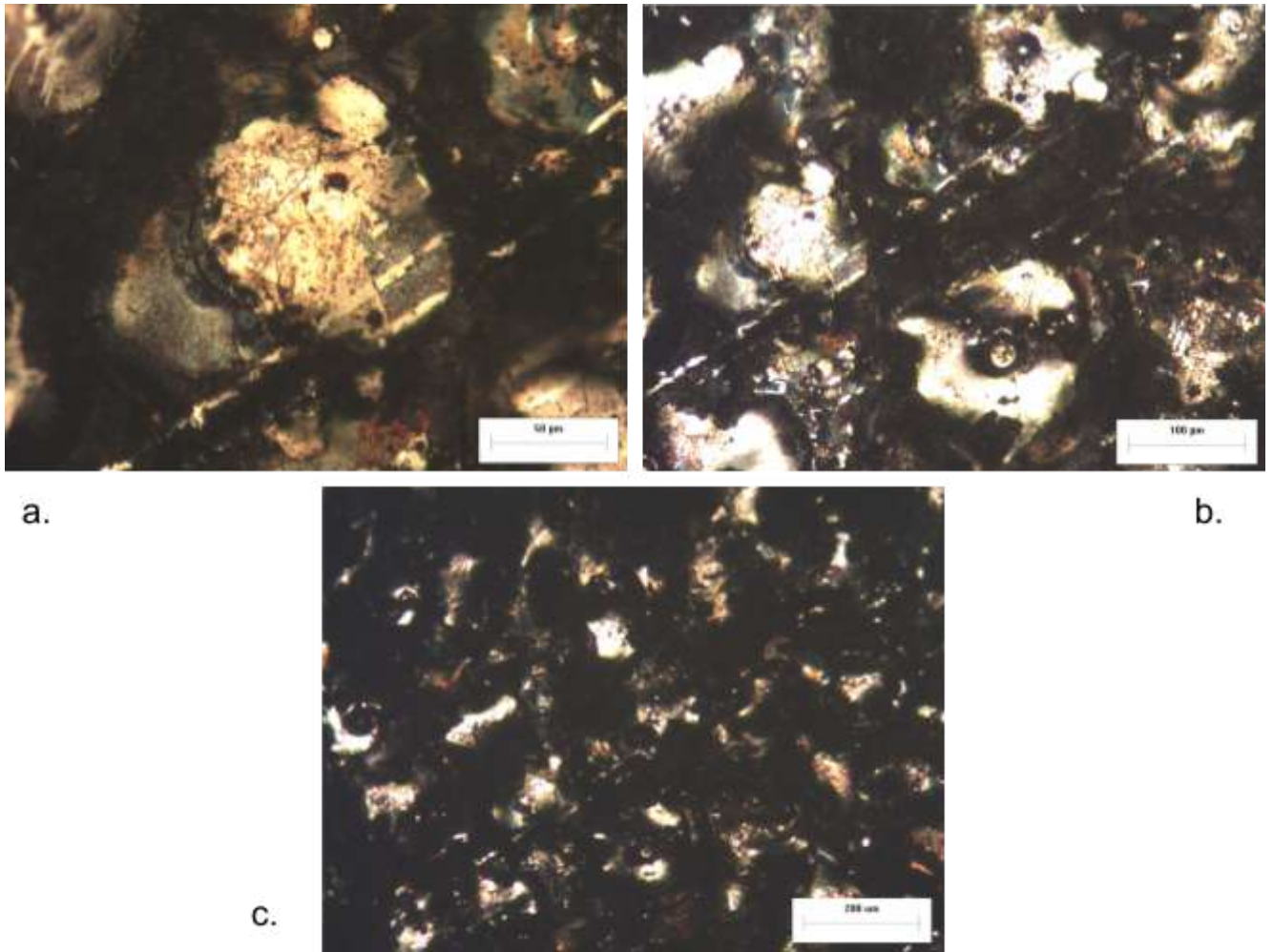


Figura 5.12. Superficie de acero inoxidable (I4) generada por EDM con nivel de potencia 2 (kerosene), polaridad inversa y electrodo de cobre electrolítico. Imágenes tomadas con microscopio óptico: a. 20x. b. 10x. c. 5x.

EDM de titanio:

El primer ensayo de EDM se realizó con un electrodo del mismo material (Ti-6Al-4V), en agua destilada y con un nivel de potencia 2. La probeta T2 actuó como electrodo ya que se ensayo con polaridad directa. Las superficies generadas, tanto de la probeta como del electrodo, corresponden a las Figuras 5.13 y 5.14, respectivamente. En la probeta se observa que la superficie electroerosionada fue significativamente modificada, presenciando material redepositado con una forma irregular. En el electrodo también se observa una modificación superficial, donde es posible visualizar óxidos con colores dorados y violetas. En comparación, la superficie ensayada con polaridad directa resulta ser más oscura aunque el relieve es menor. El tiempo de ensayo fue de 29 minutos y 10 segundos para electroerosionar 0,2 mm.

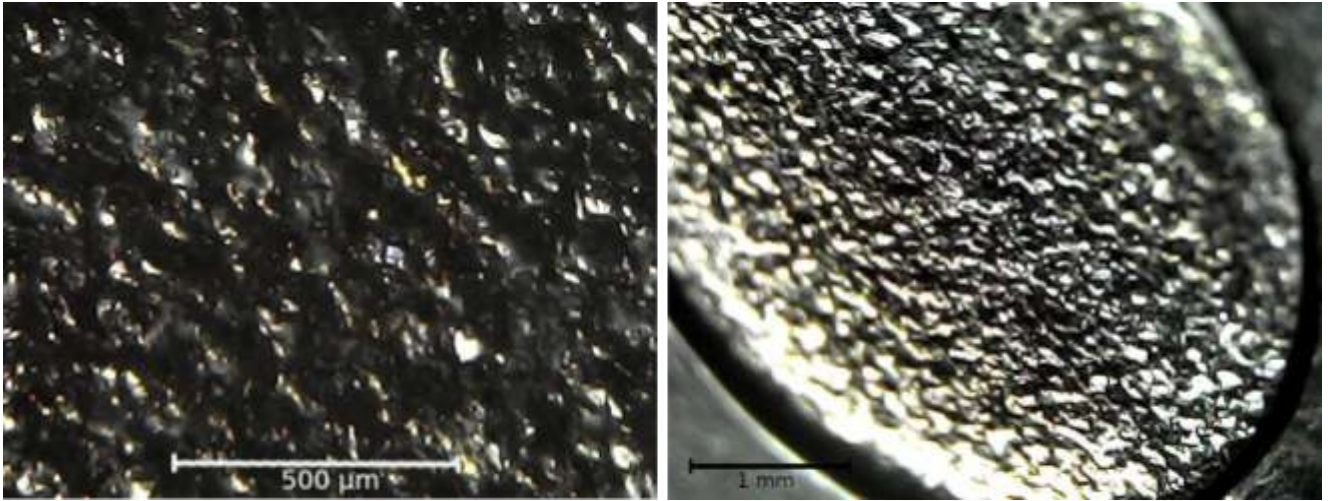


Figura 5.13. Superficie de Ti-6Al-4V (T1) generada por EDM con nivel de potencia 2 (H₂O), polaridad inversa y electrodo de Ti-6Al-4V. Imágenes tomadas con microscopio USB.

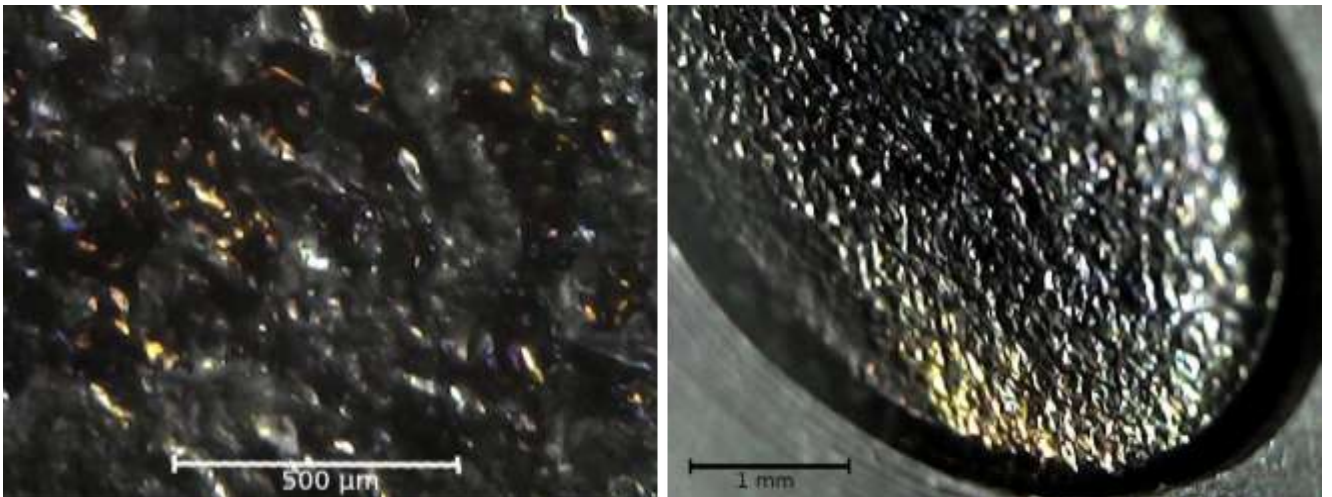


Figura 5.14. Superficie de Ti-6Al-4V (T2) generada por EDM con nivel de potencia 2 (H₂O), polaridad directa y electrodo de Ti-6Al-4V.

El siguiente ensayo se realizó con el mismo nivel de potencia, polaridad y dieléctrico, cambiando el electrodo por uno de cobre electrolítico. En la superficie (Figura 5.15), hay presencia de material redepositado en forma de esferas y óxidos de colores dorados y azules. A bajos aumentos, se puede observar en el centro una superficie opaca con un borde brillante. Para electroerosionar 0,2 mm, el ensayo duró 23 minutos con 2 segundos.

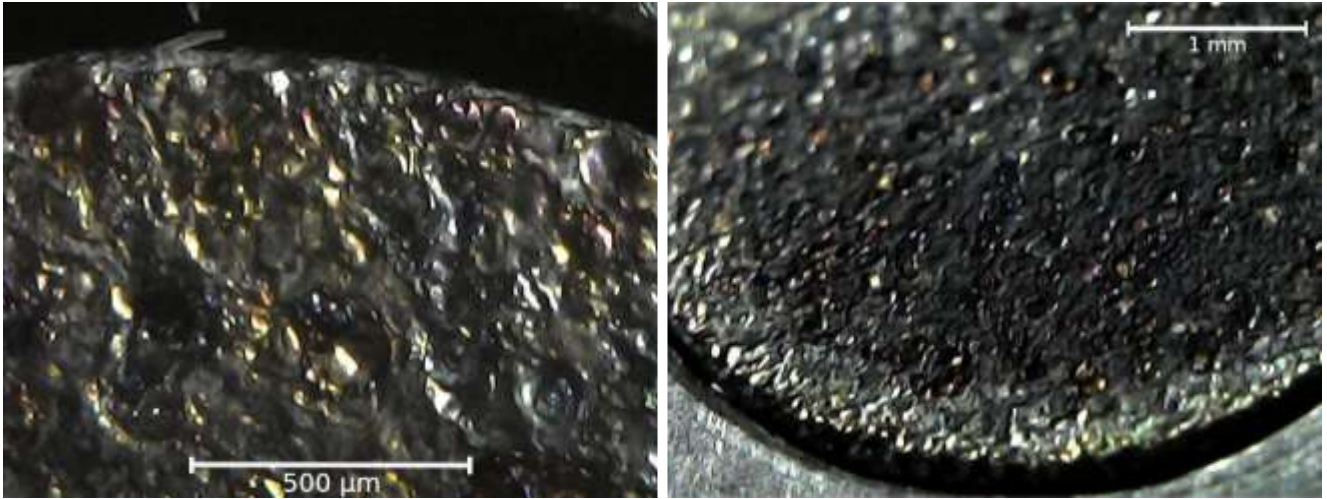


Figura 5.15. Superficie de Ti-6Al-4V (T5) generada por EDM con nivel de potencia 2 (H_2O), polaridad inversa y electrodo de cobre electrolítico. Imágenes tomadas con microscopio USB.

En los siguientes ensayos, se utilizó un electrodo de cobre electrolítico. La elección del electrodo se debe a que tiene una tasa de remoción mayor durante el ensayo. Además, facilita el set up y la alineación porque la superficie del electrodo es más grande que la de la probeta.

En la Figura 5.16, se muestran las imágenes de una superficie electroerosionada con un nivel de potencia 5 y agua destilada como dieléctrico. En la Figura 5.16.b, se observa el detalle de la superficie en el contorno de la zona electroerosionada, mientras que la Figura 5.16.c corresponde a la zona central. Se observa material redepositado en forma de esferas. El tamaño de las gotas es mayor que en el ensayo a nivel 2, coherente con la mayor densidad de corriente utilizada. Hay presencia de óxidos dorados y azules. Sin embargo, no hay fisuras visibles. A bajos aumentos se pueden visualizar aleatoriamente zonas opacas y zonas brillantes. A diferencia del ensayo a baja potencia, no se observa el aro exterior brillante y el centro opaco. El tiempo para electroerosionar 0,1 mm fue de 6 minutos y 7 segundos.

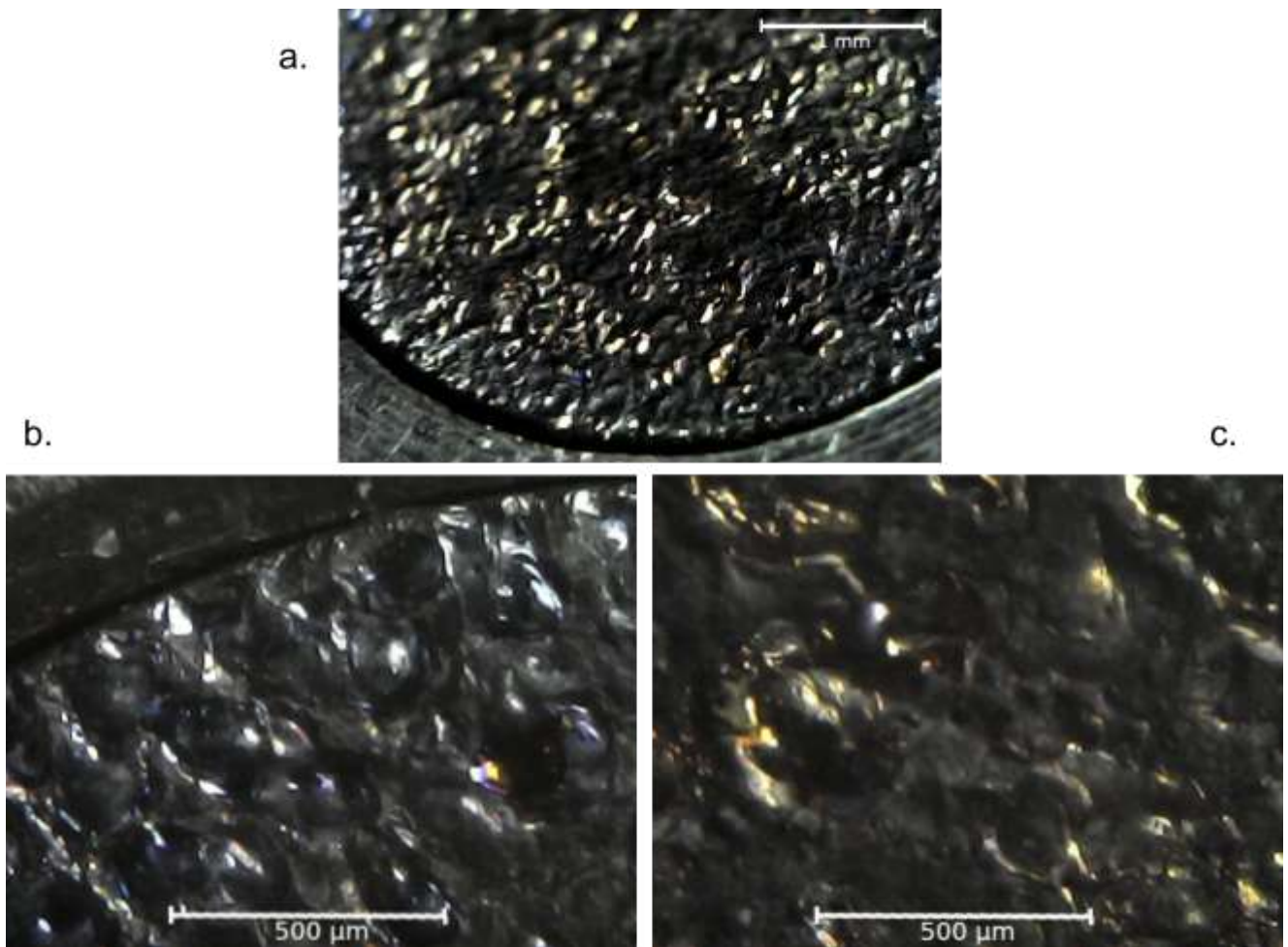


Figura 5.16. Superficie de Ti-6Al-4V (T2') generada por EDM con nivel de potencia 5 (H₂O), polaridad inversa y electrodo de cobre electrolítico. Imágenes tomadas con microscopio USB.

Se realizaron los mismos dos últimos ensayos (nivel de potencia 2 y 5 con electrodo de cobre electrolítico) cambiando el dieléctrico por kerosene. En la Figura 5.17, se electroerosionó la superficie con un nivel de potencia 2. El material redepositado tiene una forma regular esférica y el tamaño es significativamente menor al generado con agua destilada. La superficie es uniformemente brillante y no se observan los mismos óxidos presentes en las superficies anteriores. Sin embargo, a bajos aumentos, hay presencia de un aro exterior más brillante que el centro. El ensayo se interrumpió a los 15 minutos y el cabezal recorrió 0,06 mm. El proceso resultó ser menos enérgico que en agua destilada.

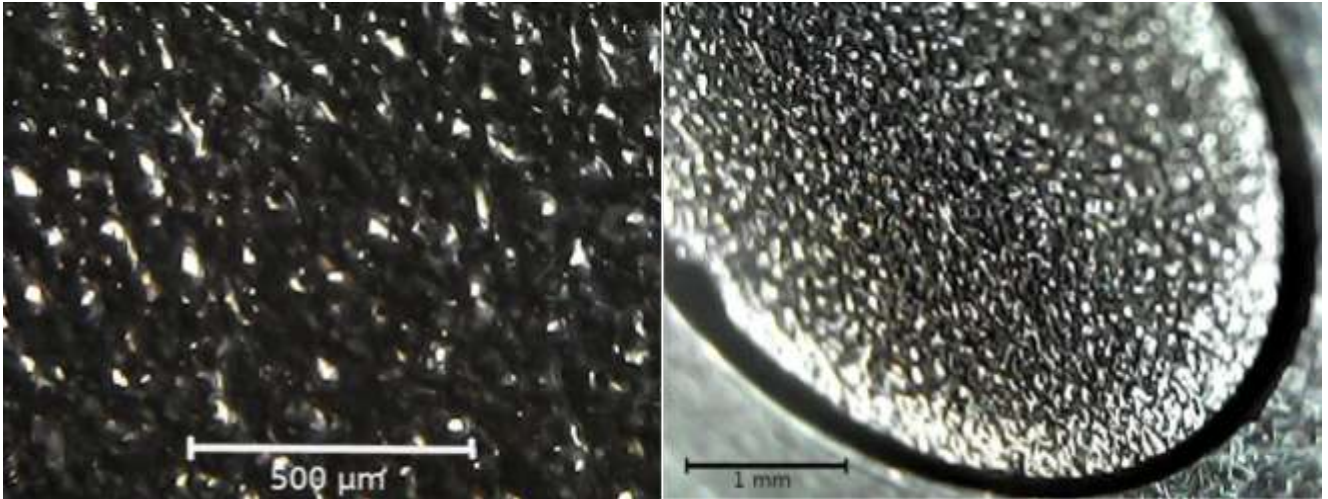


Figura 5.17. Superficie de Ti-6Al-4V (T4') generada por EDM con nivel de potencia 2 (kerosene), polaridad inversa y electrodo de cobre electrolítico. Imágenes tomadas con microscopio USB.

La superficie generada con kerosene y nivel de potencia 5 se muestra en la Figura 5.18. A diferencia de la superficie electroerosionada a baja potencia, el material redepositado resultó ser de forma más irregular y levemente más grande. A bajos aumentos, se observan aleatoriamente zonas brillantes y opacas, como se visualizó en alta potencia con agua destilada (Figura 5.16). Sin embargo, no hay presencia de óxidos azules ni dorados como en EDM con agua destilada. En 15 minutos de ensayo, el cabezal recorrió 0,11 mm.

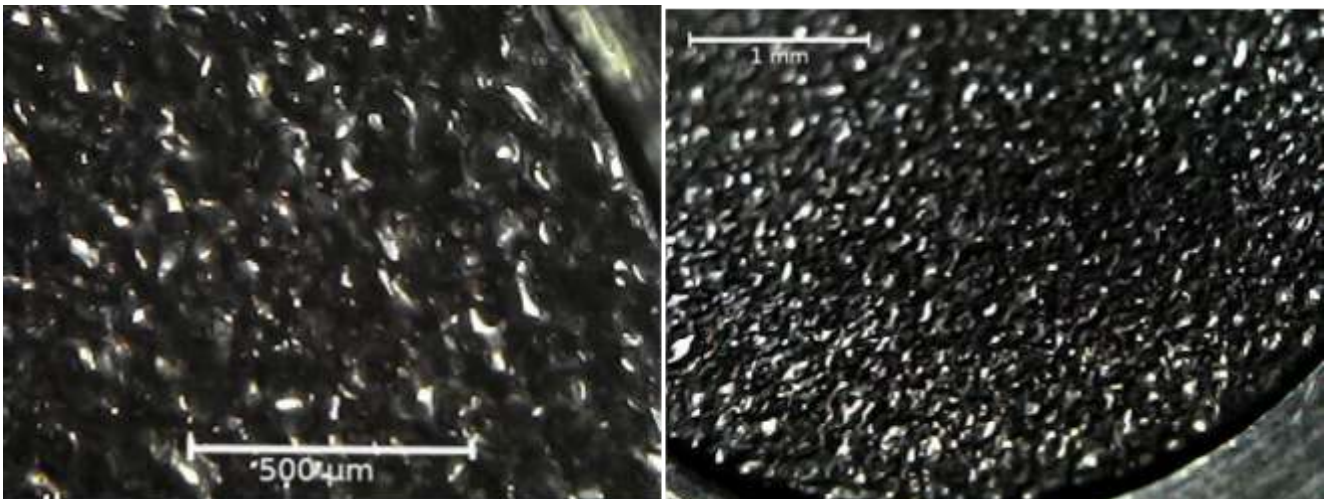


Figura 5.18. Superficie de Ti-6Al-4V (T4) generada por EDM con nivel de potencia 5 (kerosene), polaridad inversa y electrodo de cobre electrolítico. Imágenes tomadas con microscopio USB.

Comparando los ensayos de EDM en ambos materiales, se concluye que el proceso, en acero inoxidable, se comporta más enérgico utilizando kerosene. Sin embargo, en aleación de titanio, con agua destilada como dieléctrico, el proceso resulta más eficiente.

WEDM de titanio:

En las Figuras 5.19 y 5.20, las imágenes corresponden a una superficie electroerosionada por hilo con nivel de potencia 102. A bajos aumentos, es posible identificar zonas con diferentes texturas. Por la dificultad de enfoque para tomar las imágenes a altos aumentos, se puede deducir que la diferencia de altura es significativa entre picos y valles. A su vez, los colores del material redepositado son azul, violeta y dorado/cobre. Se observa una gran cantidad de fisuras a altos aumentos (Figura 5.20.a). El corte completo de la superficie fue realizado en 1 minuto y 5 segundos.



Figura 5.19. Superficie de Ti-6Al-4V (7I) generada por WEDM con nivel de potencia 102. Imágenes tomadas con microscopio USB.

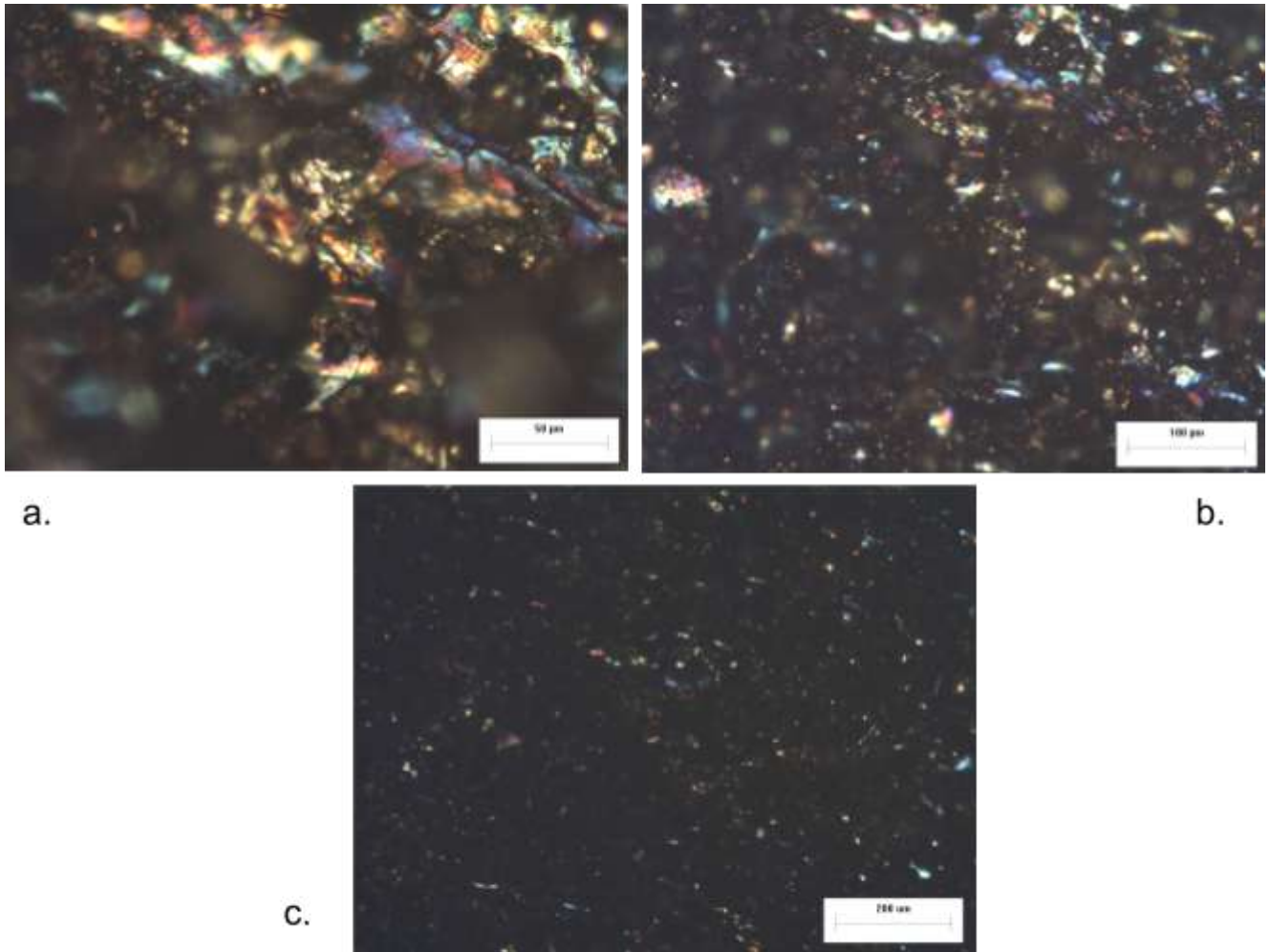


Figura 5.20. Superficie de Ti-6Al-4V (8I) generada por WEDM con nivel de potencia 102. Imágenes tomadas con microscopio óptico: a. 20x. b. 10x. c. 5x.

En las Figuras 5.21 y 5.22, se observa una superficie electroerosionada por hilo con nivel de potencia 101. A bajos aumentos, se observan zonas opacas y zonas brillantes debido al movimiento axial del hilo durante el proceso. Es interesante el resultado en la superficie donde el hilo terminó de cortar ya que se observa una zona completamente dorada. Al igual que en la Figura 5.20, se evidencia una significativa diferencia de altura entre picos y valles por el enfoque a altos aumentos. Los colores presentes son azul, violeta y dorado. El tamaño del material redepositado es levemente menor al caso anterior. También, hay presencia de fisuras, aunque en menor cantidad. El tiempo de corte fue de 1 minuto y 8 segundos, siendo ligeramente mayor que en el nivel de potencia 102.

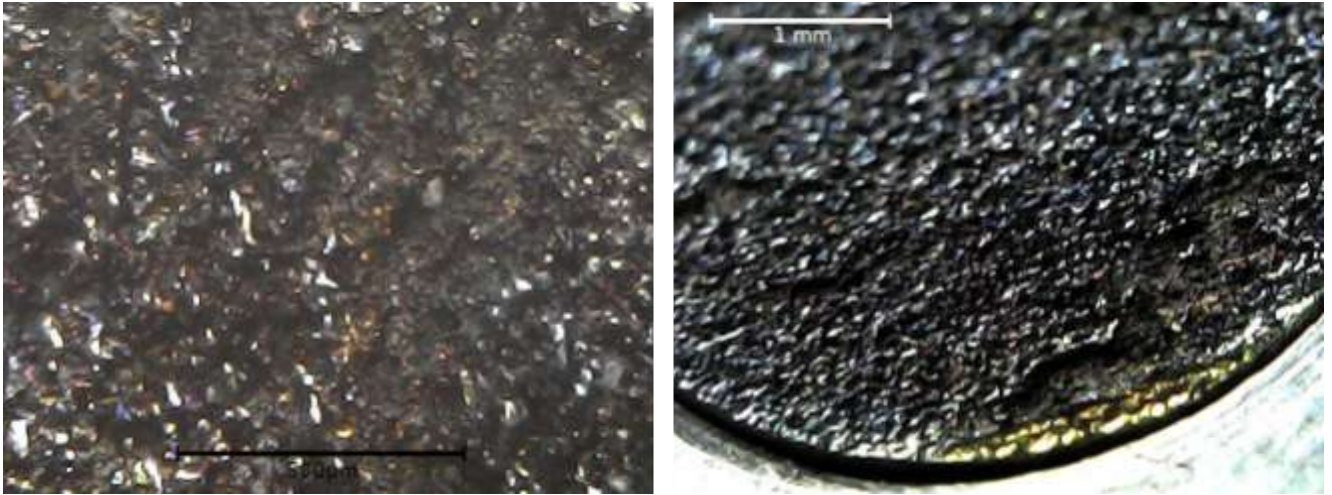


Figura 5.21. Superficie de Ti-6Al-4V (6S) generada por WEDM con nivel de potencia 101. Imágenes tomadas con microscopio USB.

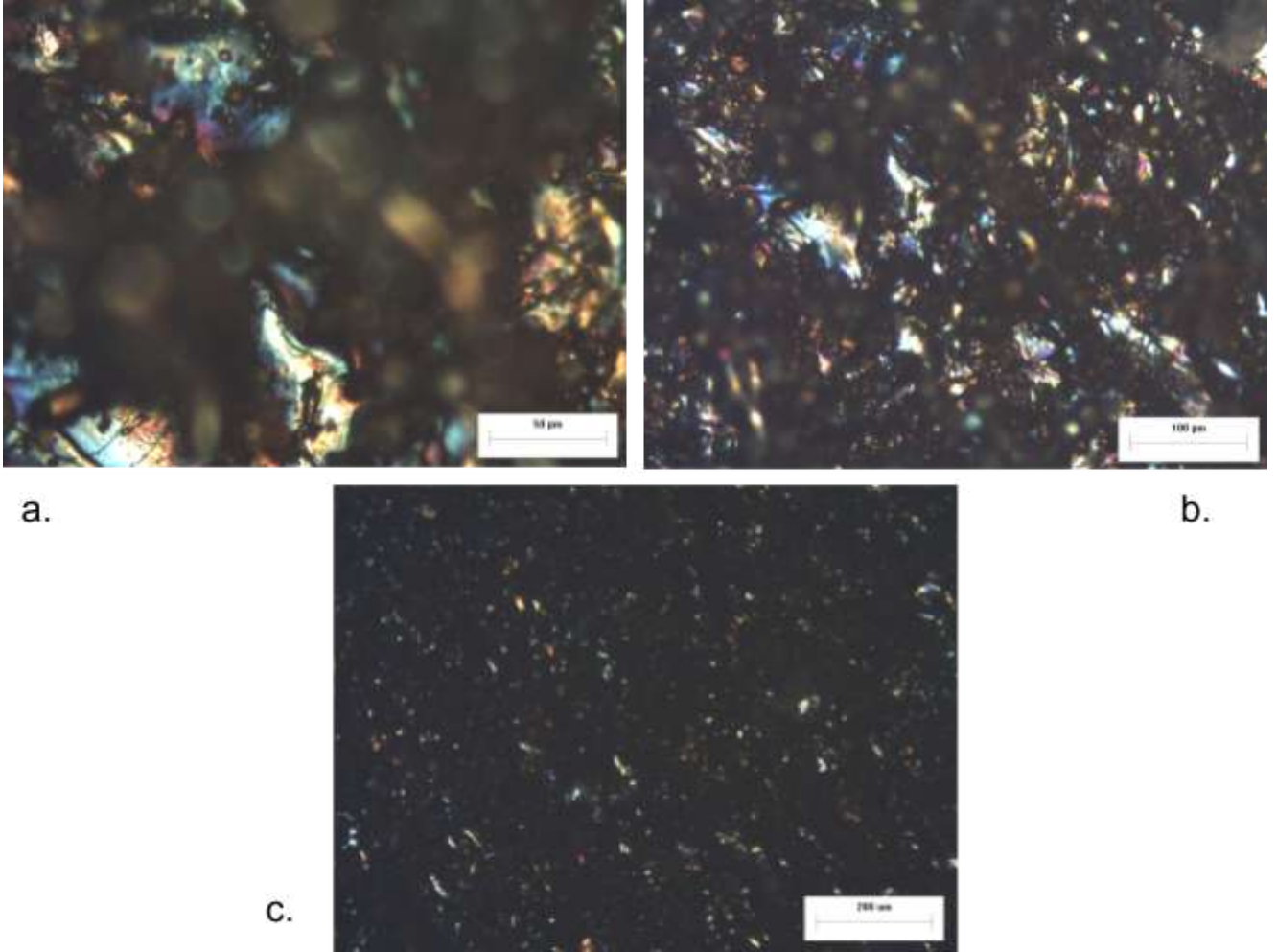


Figura 5.22. Superficie de Ti-6Al-4V (7S) generada por WEDM con nivel de potencia 101. Imágenes tomadas con microscopio óptico: a. 20x. b. 10x. c. 5x.

En las Figuras 5.23 y 5.24, se presentan las imágenes de la probeta electroerosionada por hilo con un nivel de potencia 103. A diferencia de las superficies generadas con mayor potencia, a bajos aumentos se encuentra mayor cantidad de zonas brillantes que opacas. El material resolidificado presenta una forma irregular y bordes indefinidos con colores azules, violetas y dorados. Se observa una baja densidad de fisuras en la superficie.

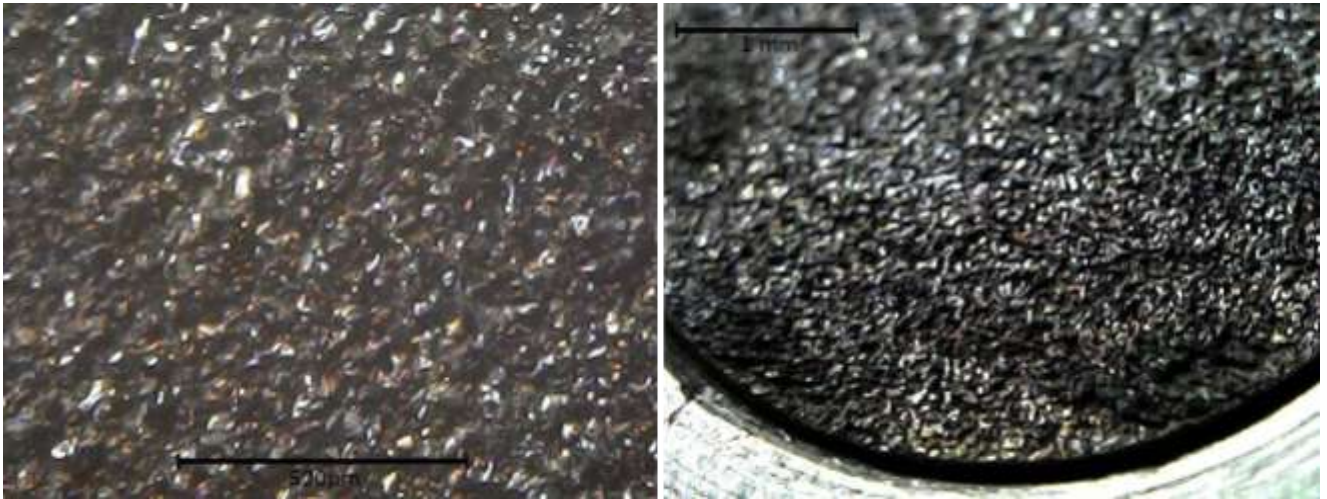


Figura 5.23. Superficie de Ti-6Al-4V (1) generada por WEDM con nivel de potencia 103. Imágenes tomadas con microscopio USB.

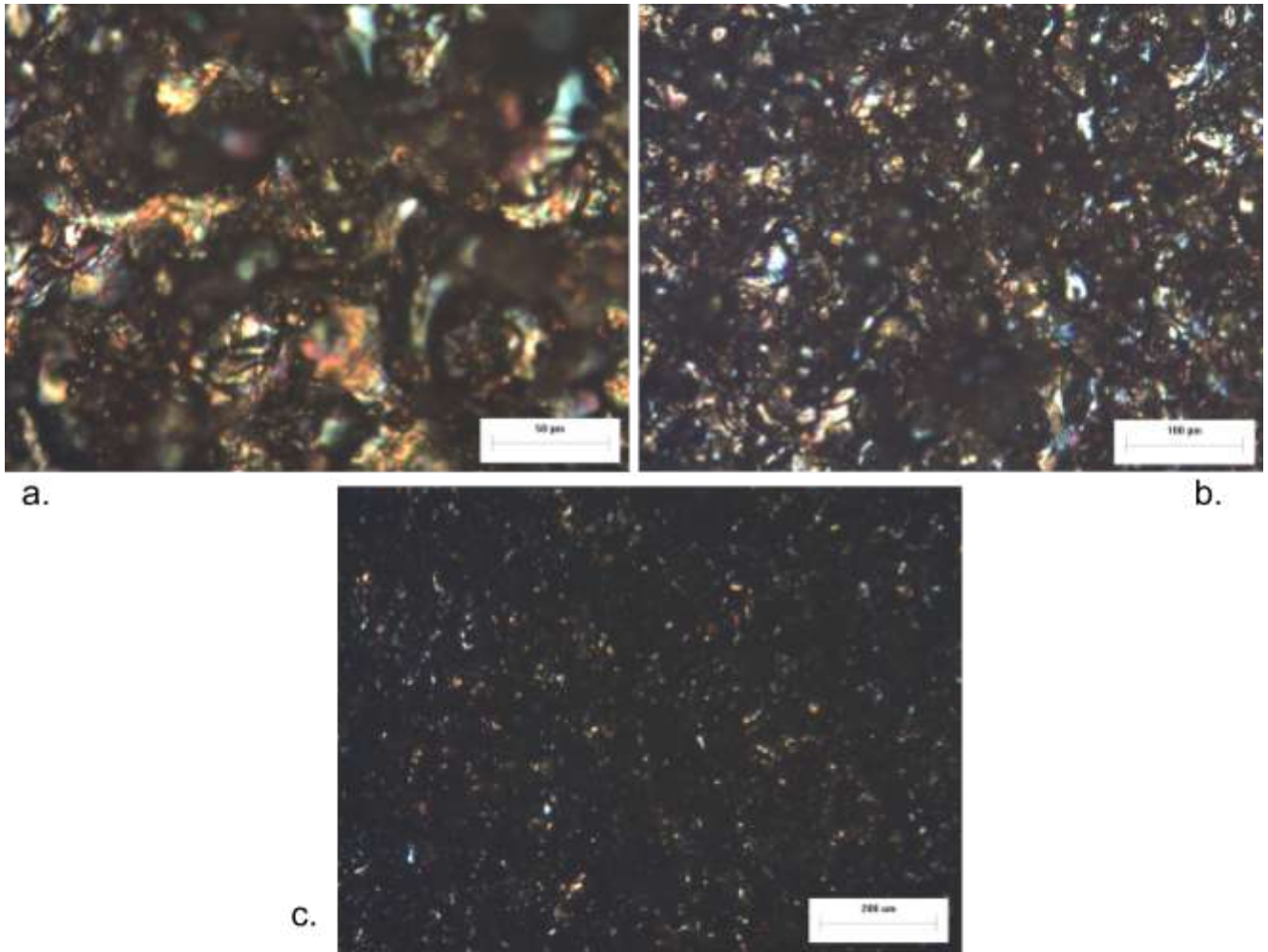


Figura 5.24. Superficie de Ti-6Al-4V (1I) generada por WEDM con nivel de potencia 103. Imágenes tomadas con microscopio óptico: a. 20x. b. 10x. c. 5x.

En las Figuras 5.25 y 5.26, se observa una superficie electroerosionada por hilo con nivel de potencia 104. Se observan claramente las franjas donde actuó el hilo con un movimiento axial en una dirección y en otra. El material redepositado presenta una forma irregular y de menor tamaño que en el nivel de potencia 103. Se observan colores azules, violetas y dorados, al igual que en la Figura 5.24. Además, no hay presencia de fisuras como en los ensayos mencionados con anterioridad. El tiempo de corte completo fue de 2 minutos y 39 segundos.

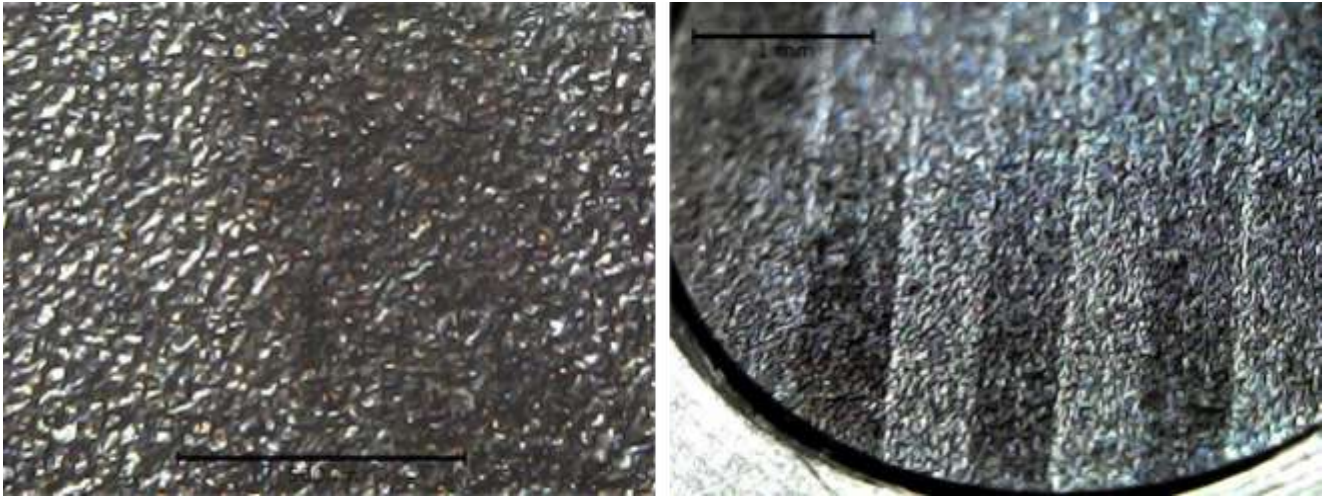


Figura 5.25. Superficie de Ti-6Al-4V (2I) generada por WEDM con nivel de potencia 104. Imágenes tomadas con microscopio USB.

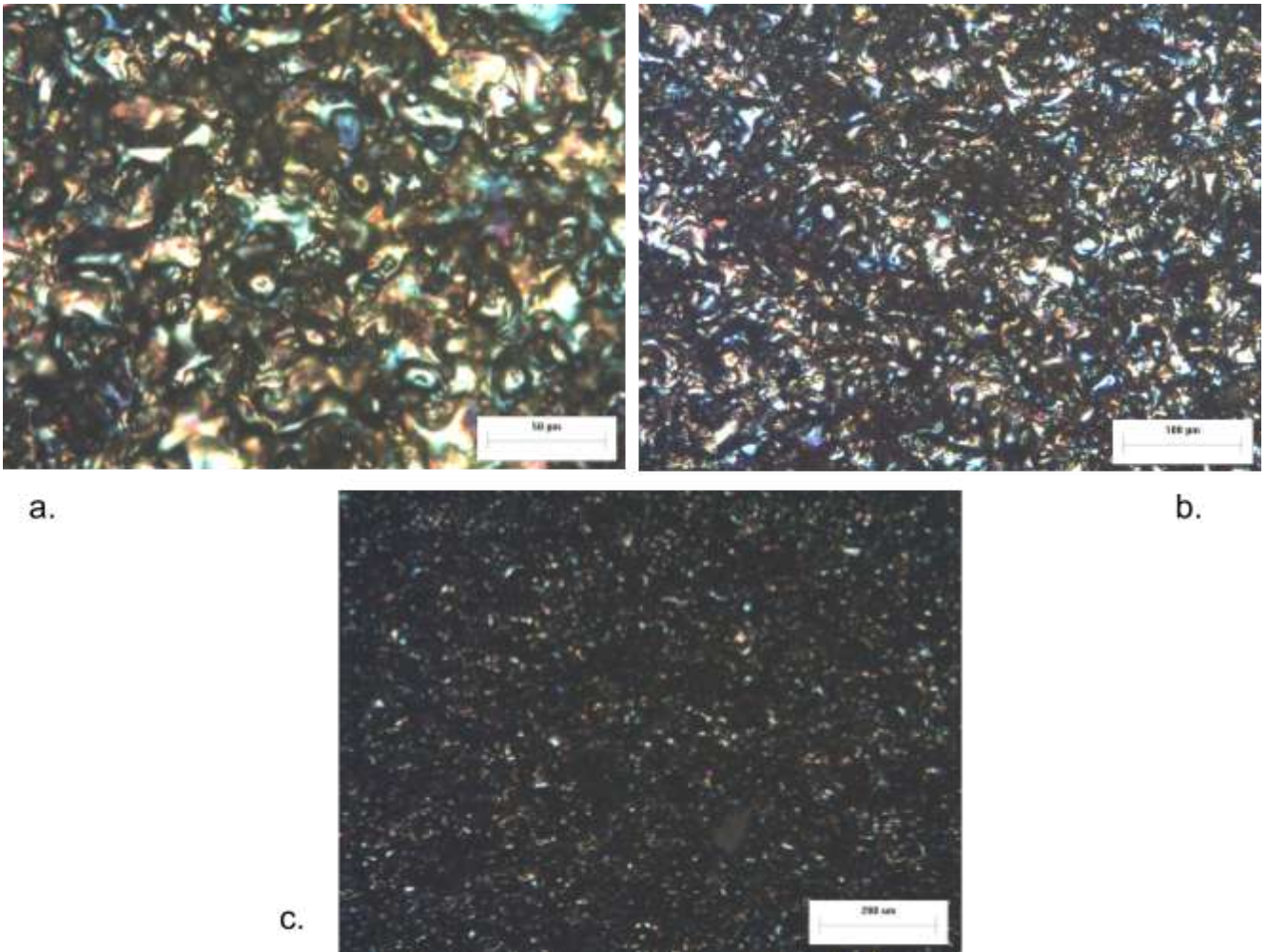


Figura 5.26. Superficie de Ti-6Al-4V (3S) generada por WEDM con nivel de potencia 104. Imágenes tomadas con microscopio óptico: a. 20x. b. 10x. c. 5x.

En las Figuras 5.27 y 5.28, se observa una superficie electroerosionada con nivel de potencia 105. A bajos aumentos, se observa una superficie completamente brillante. Además, las franjas generadas por el hilo de corte son más angostas que en los ensayos anteriores. Se realizó un solo corte en esta condición de ensayo ya que el corte completo requirió más de 5 minutos. Se concluye que a gran escala no sería productivo. El material redepositado presenta un color dorado uniforme a diferencia de los otros ensayos. A su vez, el tamaño de las gotas es de la mitad que en el nivel de potencia 104.

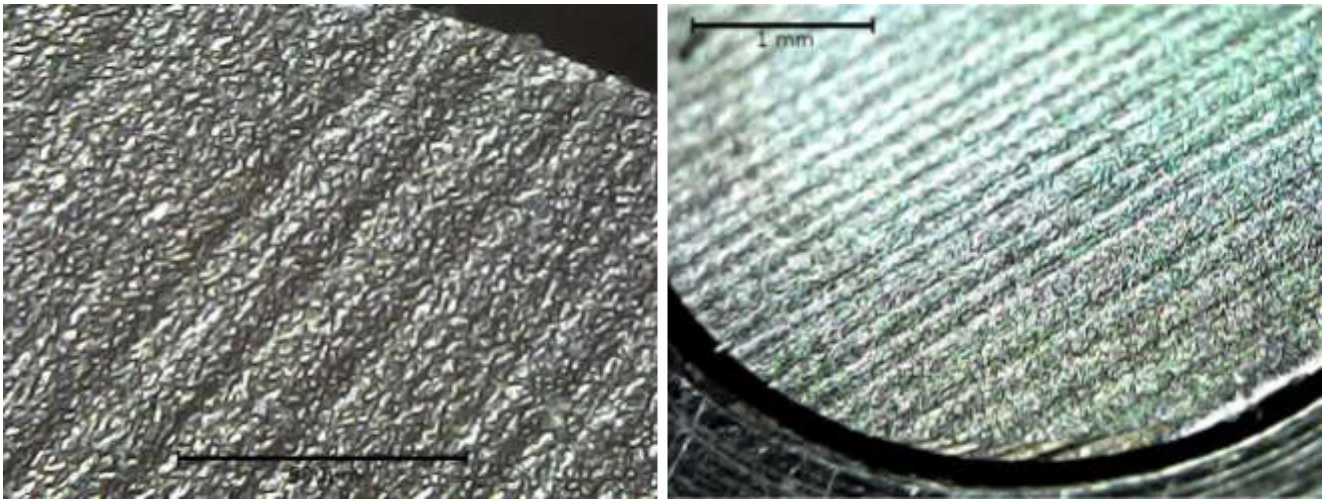


Figura 5.27. Superficie de Ti-6Al-4V (4I) generada por WEDM con nivel de potencia 105. Imágenes tomadas con microscopio USB.

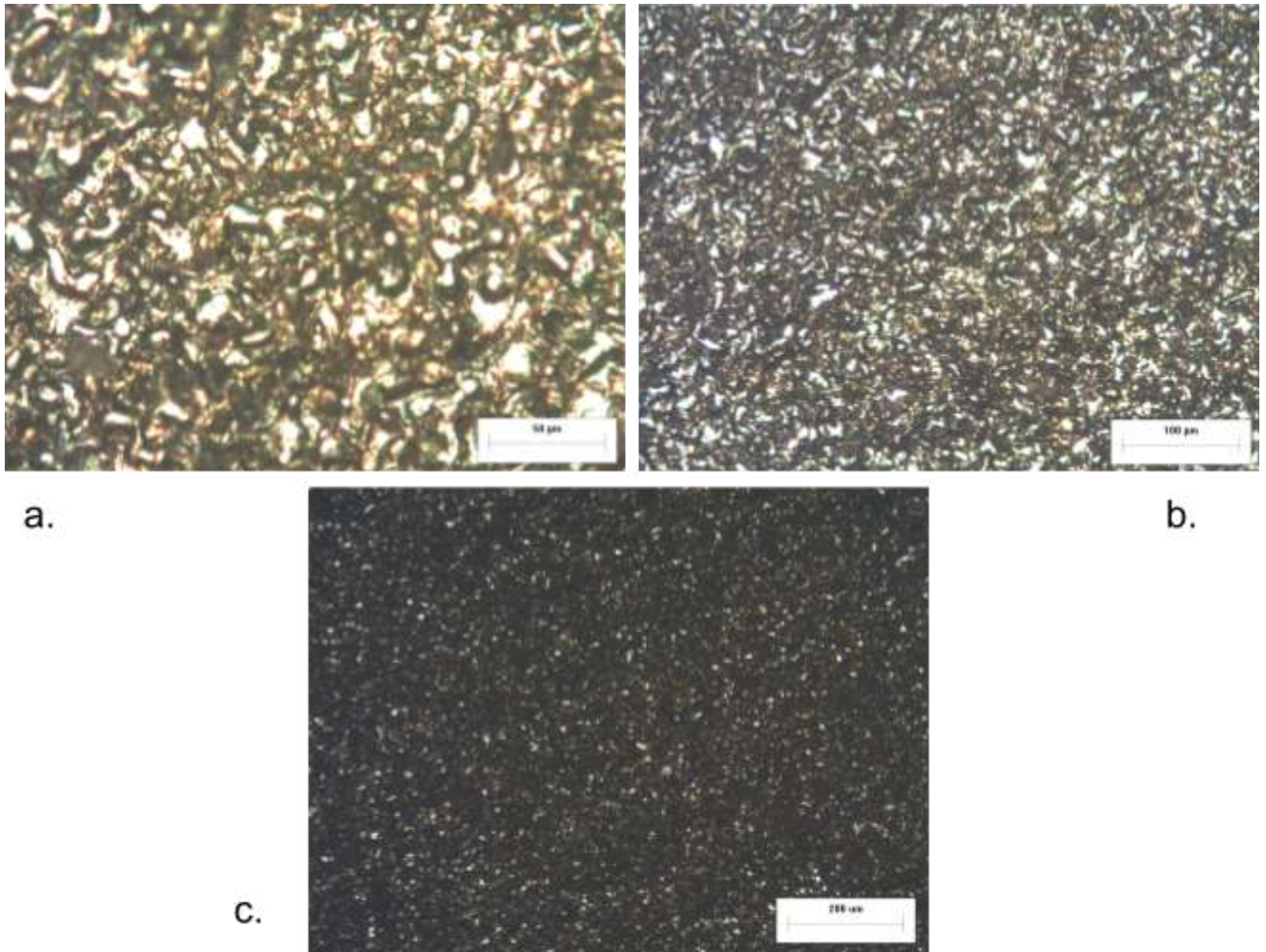


Figura 5.28. Superficie de Ti-6Al-4V (4I) generada por WEDM con nivel de potencia 105. Imágenes tomadas con microscopio óptico: a. 20x. b. 10x. c. 5x.

En conclusión, en todos los ensayos el material redepositado presenta una forma irregular y su tamaño está directamente vinculado a la potencia aplicada. Además, a mayor tamaño de gota, hay una mayor diferencia de altura entre los picos y los valles del perfil. También, a mayor potencia aplicada aumenta la densidad de fisuras presentes. Los colores observados son azul, violeta y dorado, menos en la probeta cortada con menor potencia, donde solo se observa el color dorado. Los colores observados corresponderían en principio a óxidos de titanio: TiO , Ti_2O_3 y Ti_3O_5 . Las franjas generadas por el movimiento del hilo son cada vez más angostas a medida que disminuye la potencia aplicada.

WEDM de acero inoxidable:

Las Figuras 5.29 y 5.30 corresponden a una superficie generada por WEDM a un nivel de potencia 102. Al igual que en las superficies de titanio generadas por este proceso, hay presencia de zonas opacas y brillantes. Se observa una superficie altamente modificada con material redepositado con forma irregular. A bajos aumentos, se puede observar claramente la diferencia de textura entre las zonas brillantes y opacas. Las zonas brillantes parecen

tener picos y valles de mayor tamaño y más regulares que los de las zonas opacas. La diferencia de altura entre pico y valle resulta significativa por la dificultad para enfocar a altos aumentos. El color de la superficie es uniformemente dorado. Además, no hay presencia de fisuras. El tiempo de corte completo de la superficie fue de 32 segundos.

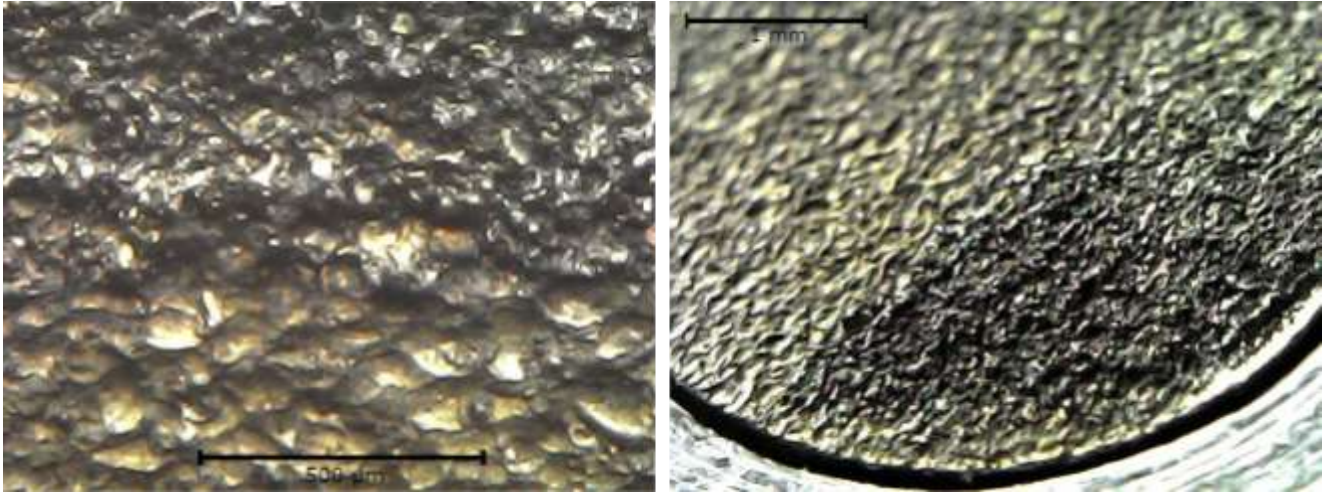


Figura 5.29. Superficie de acero inoxidable (171) generada por WEDM con nivel de potencia 102. Imágenes tomadas con microscopio USB.

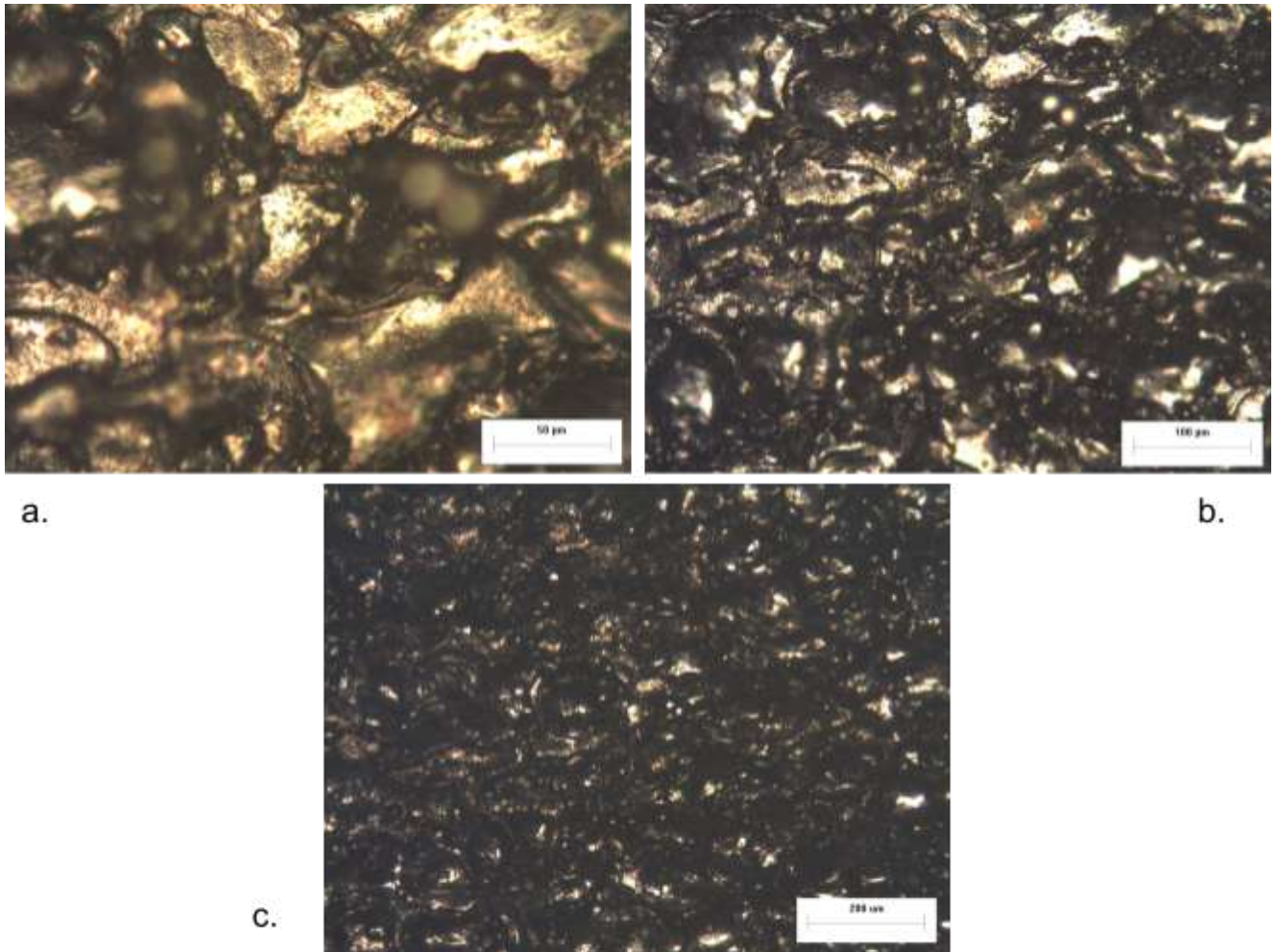


Figura 5.30. Superficie de acero inoxidable (18l) generada por WEDM con nivel de potencia C102. Imágenes tomadas con microscopio óptico: a. 20x. b. 10x. c. 5x.

Las Figuras 5.31, 5.32, 5.33 y 5.34 corresponden a superficies cortadas mediante WEDM a un nivel de potencia 101 y 103 respectivamente. Se observa una gran modificación superficial. En las imágenes de las superficies, no hay presencia de zonas opacas. Son uniformemente brillantes, aunque a bajos aumentos en el microscopio USB se puede apreciar superficies con ambas características de textura. Es decir, hay presencia de una textura uniforme con valles y picos de gran tamaño, mezclados con la textura más fina e irregular vista en las imágenes anteriores.

Sin embargo, a altos aumentos, el relieve no es tan pronunciado como es en el caso de potencia máxima ya que se logra enfocar la mayor parte de la superficie. Tampoco presentan fisuras. El tiempo de corte completo de la superficie para el nivel de potencia 101 fue de 44 segundos. Mientras que para el nivel de potencia 103, el corte completo duró 58 segundos. Es coherente que el corte se realice a mayor velocidad en el nivel 101 que en 103 ya que la potencia aplicada es mayor (Tabla 4.3). Además, el tamaño del material redepositado es mayor para el corte con mayor potencia.

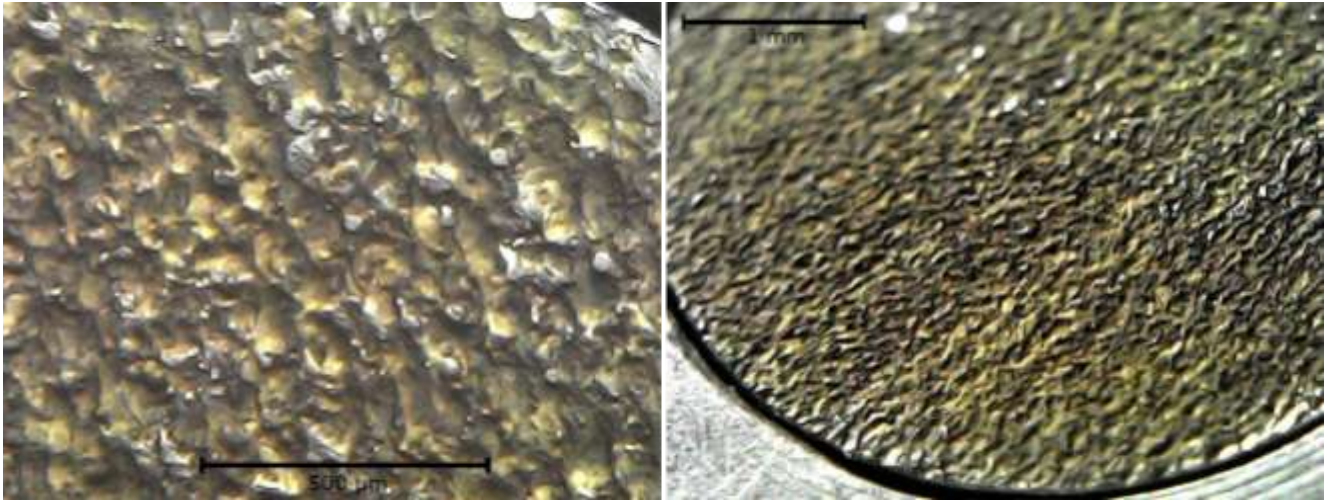


Figura 5.31. Superficie de acero inoxidable (15I) generada por WEDM con nivel de potencia 101. Imágenes tomadas con microscopio USB.

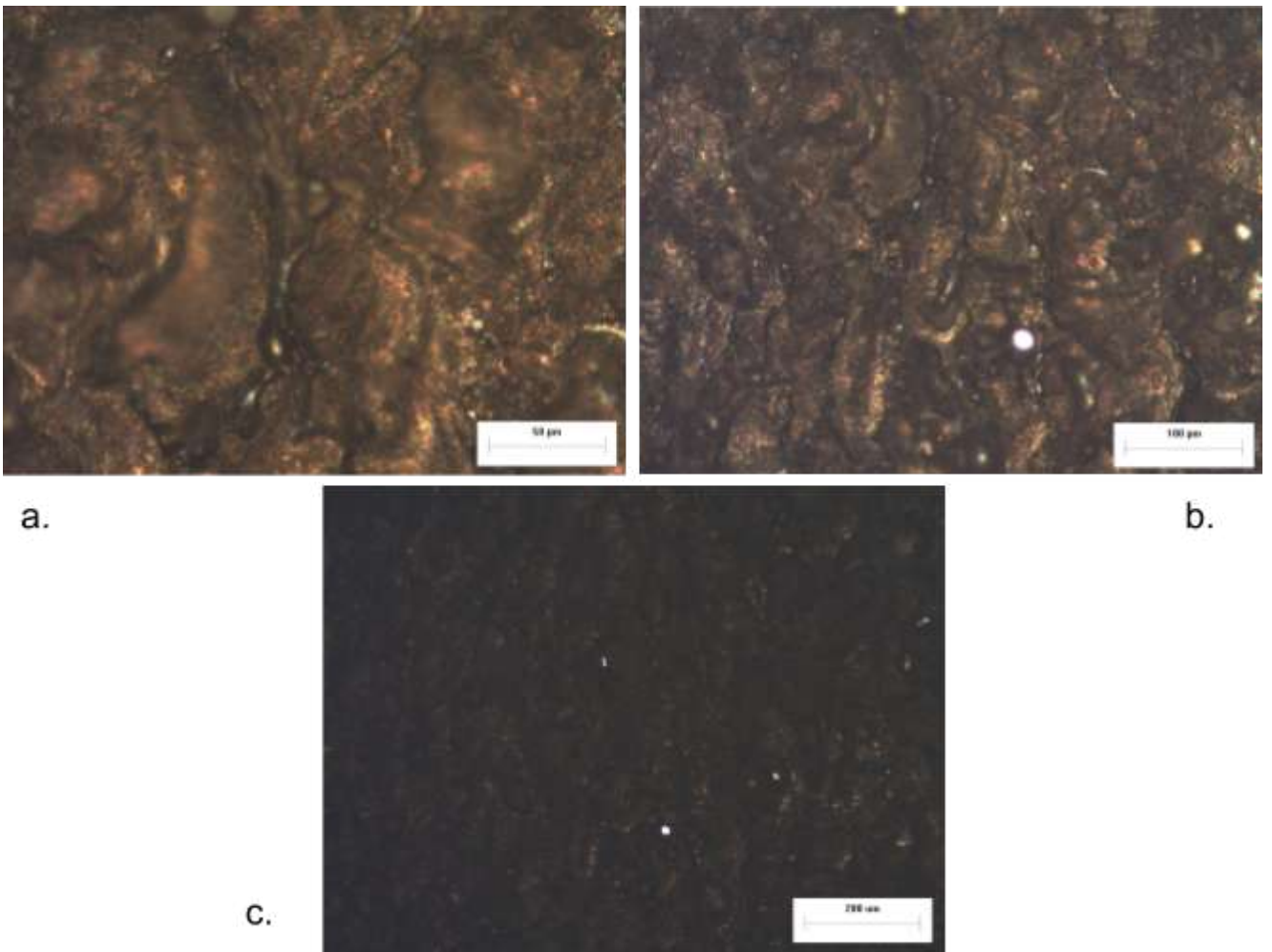


Figura 5.32. Superficie de acero inoxidable (16I) generada por WEDM con nivel de potencia 101. Imágenes tomadas con microscopio óptico: a. 20x. b. 10x. c. 5x.

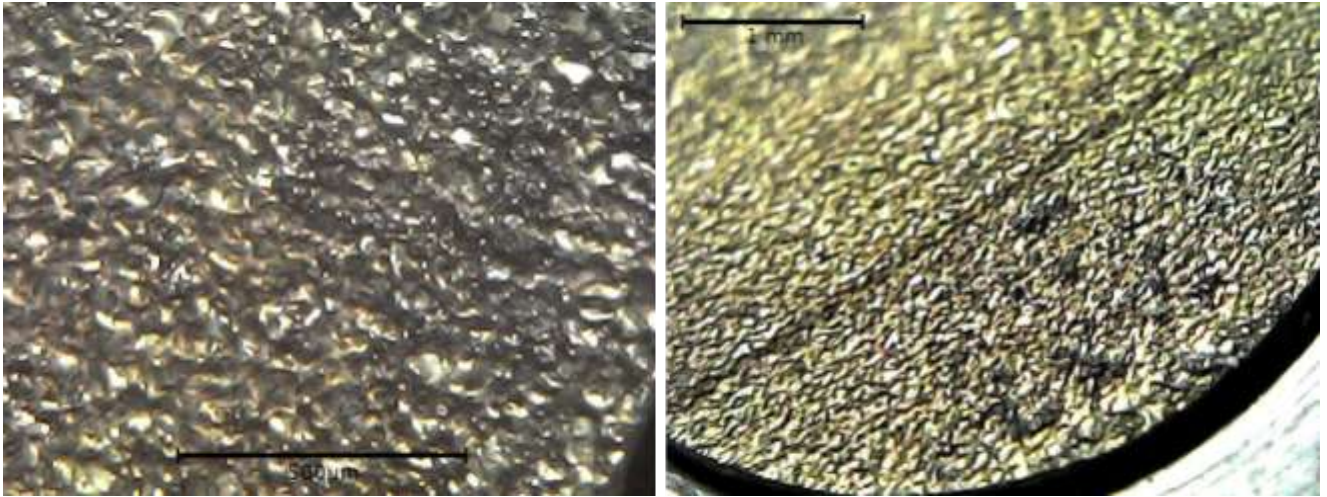


Figura 5.33. Superficie de acero inoxidable (11S) generada por WEDM con nivel de potencia 103. Imágenes tomadas con microscopio USB.

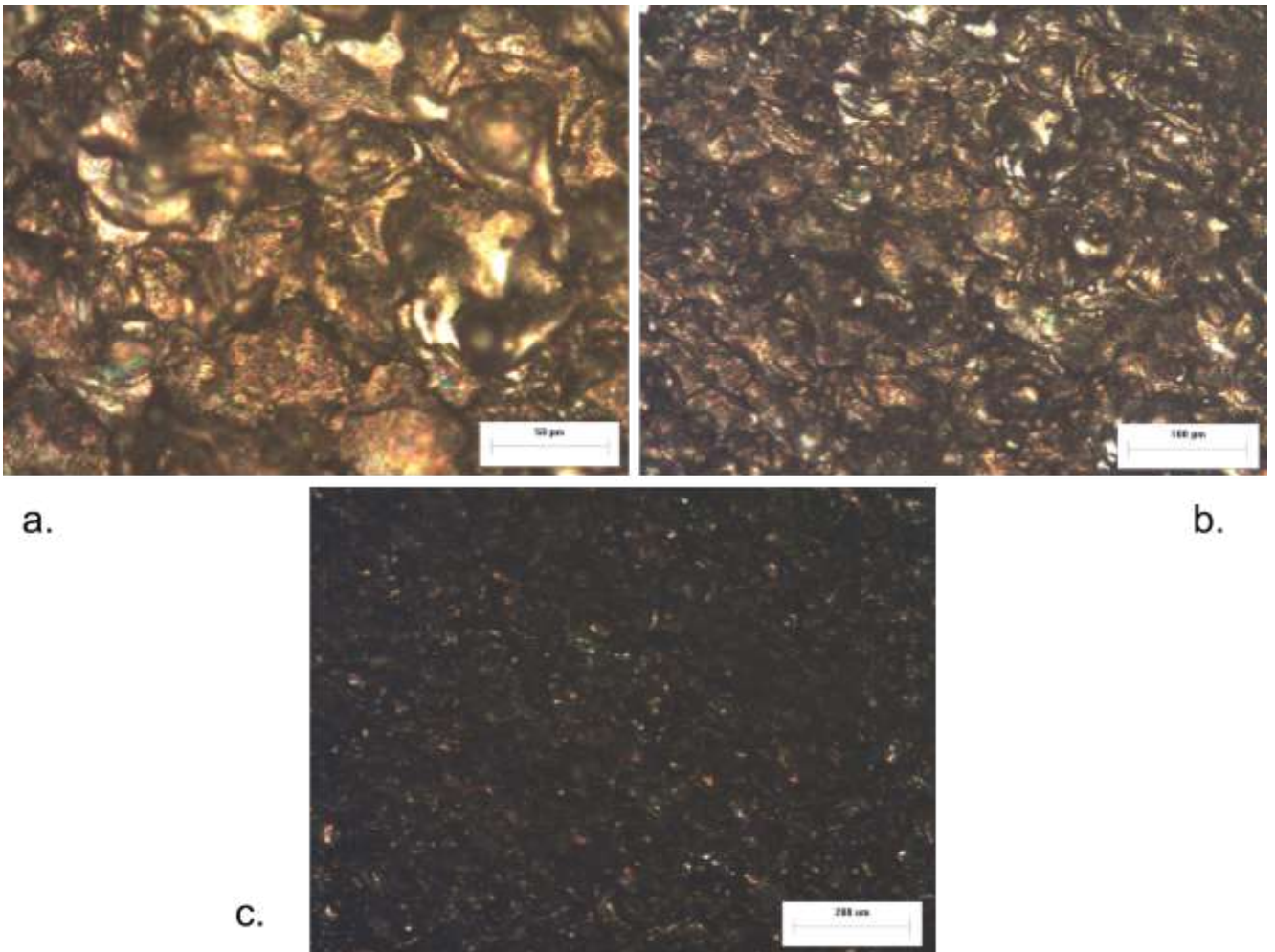


Figura 5.34. Superficie de acero inoxidable (11S) generada por WEDM con nivel de potencia 103. Imágenes tomadas con microscopio óptico: a. 20x. b. 10x. c. 5x.

En la Figura 5.35 y 5.36, se muestran las imágenes de una superficie generada a un nivel de potencia 104. A bajos aumentos, hay presencia de franjas con diferentes tonalidades que indican el movimiento del hilo de corte. El perfil superficial es más regular que los vistos anteriormente. Se observa que el material redepositado tiene una forma más regular, tendiendo a esferas. Además, es de menor tamaño, coherente con una potencia aplicada menor. El tiempo requerido para un corte completo fue de 2 minutos.

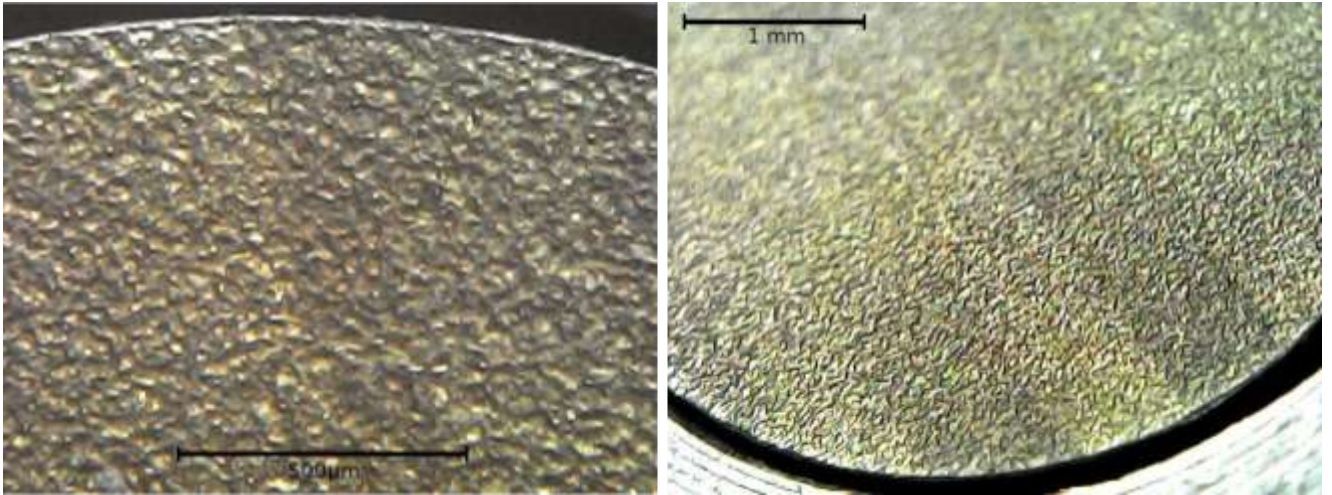


Figura 5.35. Superficie de acero inoxidable (12I) generada por WEDM con nivel de potencia 104. Imágenes tomadas con microscopio USB.

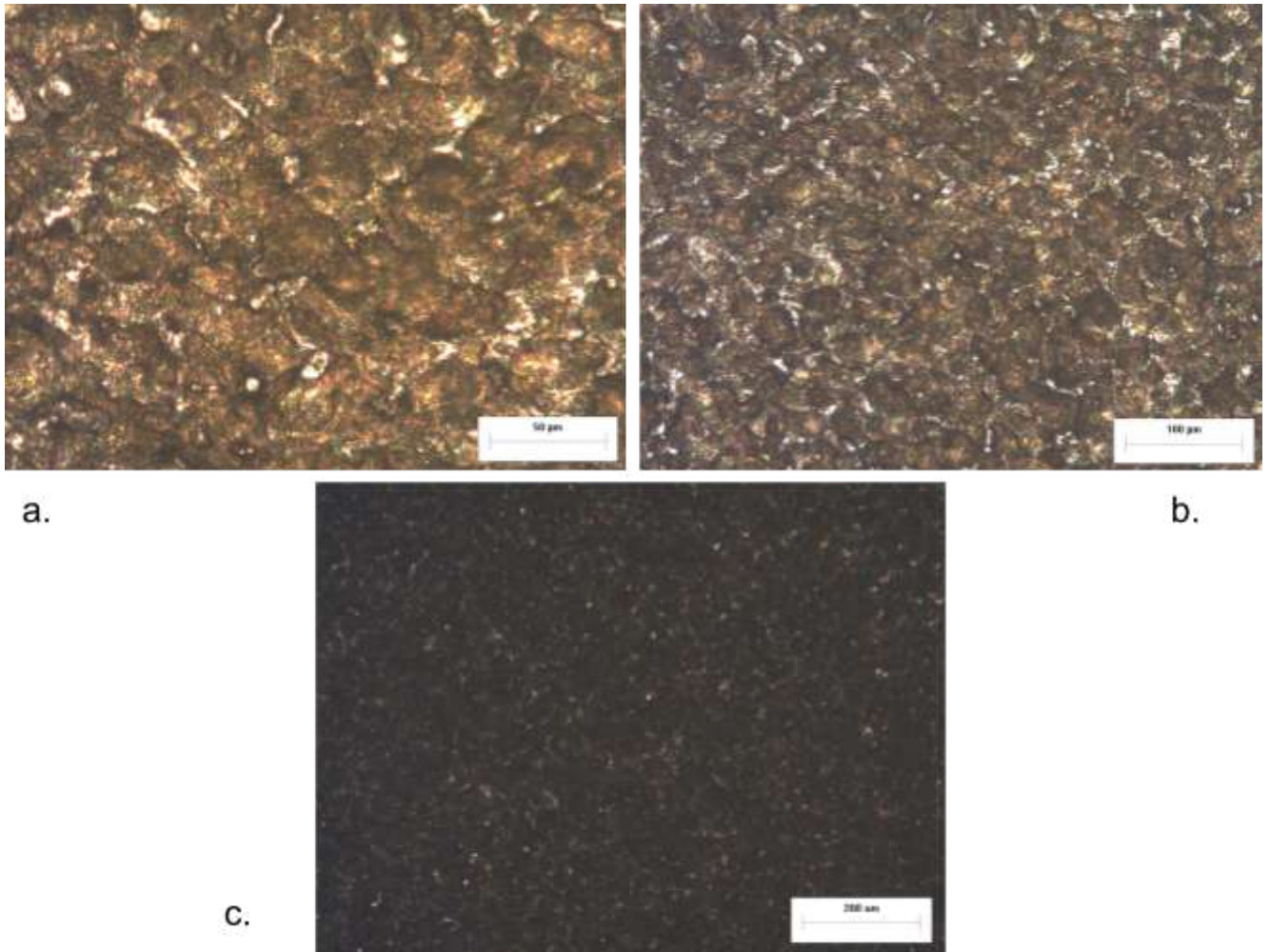


Figura 5.36. Superficie de acero inoxidable (121) generada por WEDM con nivel de potencia 104. Imágenes tomadas con microscopio óptico: a. 20x. b. 10x. c. 5x.

No fue posible tomar imágenes de la superficie mecanizada a un nivel de potencia 105 a altos aumentos en el microscopio óptico de laboratorio por ser un corte incompleto. Sin embargo, se tomaron imágenes de la superficie con el microscopio óptico USB (Figuras 5.37 y 5.38). Es interesante apreciar la diferencia de texturas entre la zona mecanizada con un nivel de potencia 105 y el otro de 102.

En 8 minutos de ensayo, el alambre recorrió menos de 1 mm de superficie, siendo que la varilla es de 5 mm de diámetro. Al cabo de ese tiempo, se interrumpió debido a que se estima que le llevaría alrededor de 60 minutos terminar el ensayo. Se concluyó que a gran escala no sería productivo el nivel de potencia mínimo.

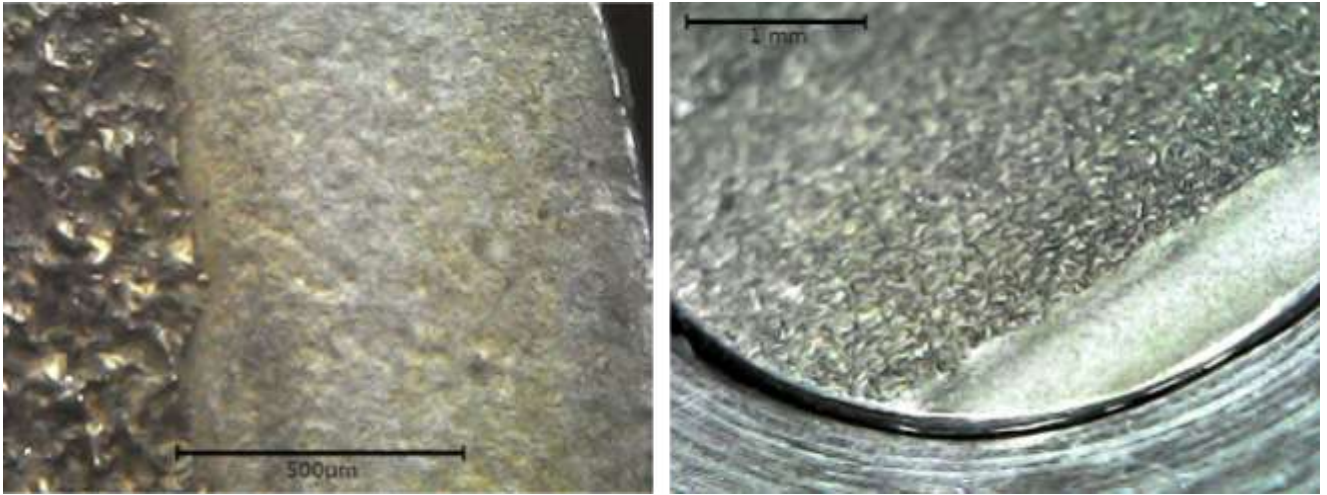


Figura 5.37. Superficie de acero inoxidable (14I) generada por WEDM con nivel de potencia 105. Imágenes tomadas con microscopio USB.

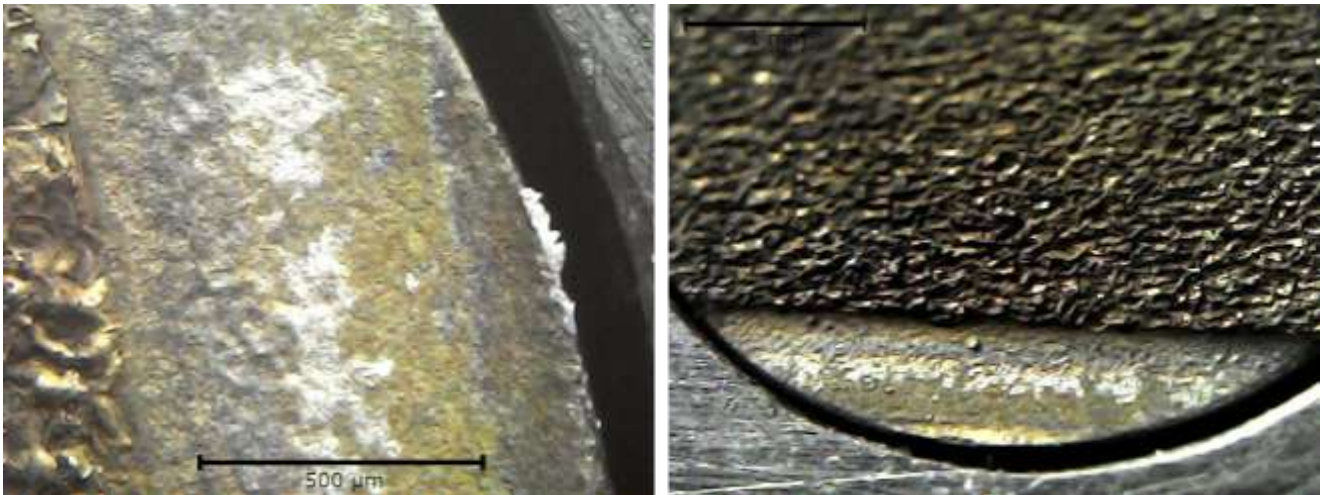


Figura 5.38. Superficie de acero inoxidable (15S) generada por WEDM con nivel de potencia 105. Imágenes tomadas con microscopio USB.

En conclusión, la tasa de remoción en acero inoxidable es directamente proporcional a la potencia aplicada durante el ensayo. Es decir, el ensayo a potencia máxima resultó ser el más rápido en realizar el corte completo de la varilla. También, el relieve superficial depende directamente de la potencia aplicada, como se analizó con anterioridad.

Comparando la velocidad de corte entre los dos materiales ensayados (Tabla 5.1), se concluye que bajo condiciones similares, el corte en acero inoxidable es más rápido que en la aleación de titanio. Analizando los tiempos de corte, en un nivel de potencia 102, la velocidad del corte en acero inoxidable es del doble que en el titanio. En un nivel de potencia 104, el tiempo empleado para realizar el mismo corte en aceros inoxidables es 24,5% menor que el necesario para realizarlo en la aleación de titanio. Se observa una tendencia decreciente, hasta que en el nivel de potencia 105 se revierte la tendencia, empleando menos tiempo de corte en el titanio.

Nivel de potencia	Tiempo en acero inoxidable [min:s]	Tiempo en aleación de titanio [min:s]	Fracción de tiempo [acero inoxidable / titanio]
102	0:32	1:05	0,49
101	0:44	1:08	0,65
104	2:00	2:39	0,76
105	+8 min*	5:32	N/C

Tabla 5.1. Fracción de tiempos de mecanizado en WEDM entre acero inoxidable y aleación de titanio. *Ensayo interrumpido.

5.2.2. Rugosidad superficial

Se realizaron mediciones de rugosidad de todas las probetas ensayadas. En las Tablas 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5, se informan los datos de rugosidad promedio de las mediciones realizadas de cada muestra con la dispersión correspondiente. Los resultados se analizan en el orden empleado previamente: primero superficies obtenidas por EDM y luego las generadas por WEDM.

En las Figuras 5.39 y 5.40, se muestran dos perfiles relevados por el rugosímetro representativos de las superficies electroerosionadas.

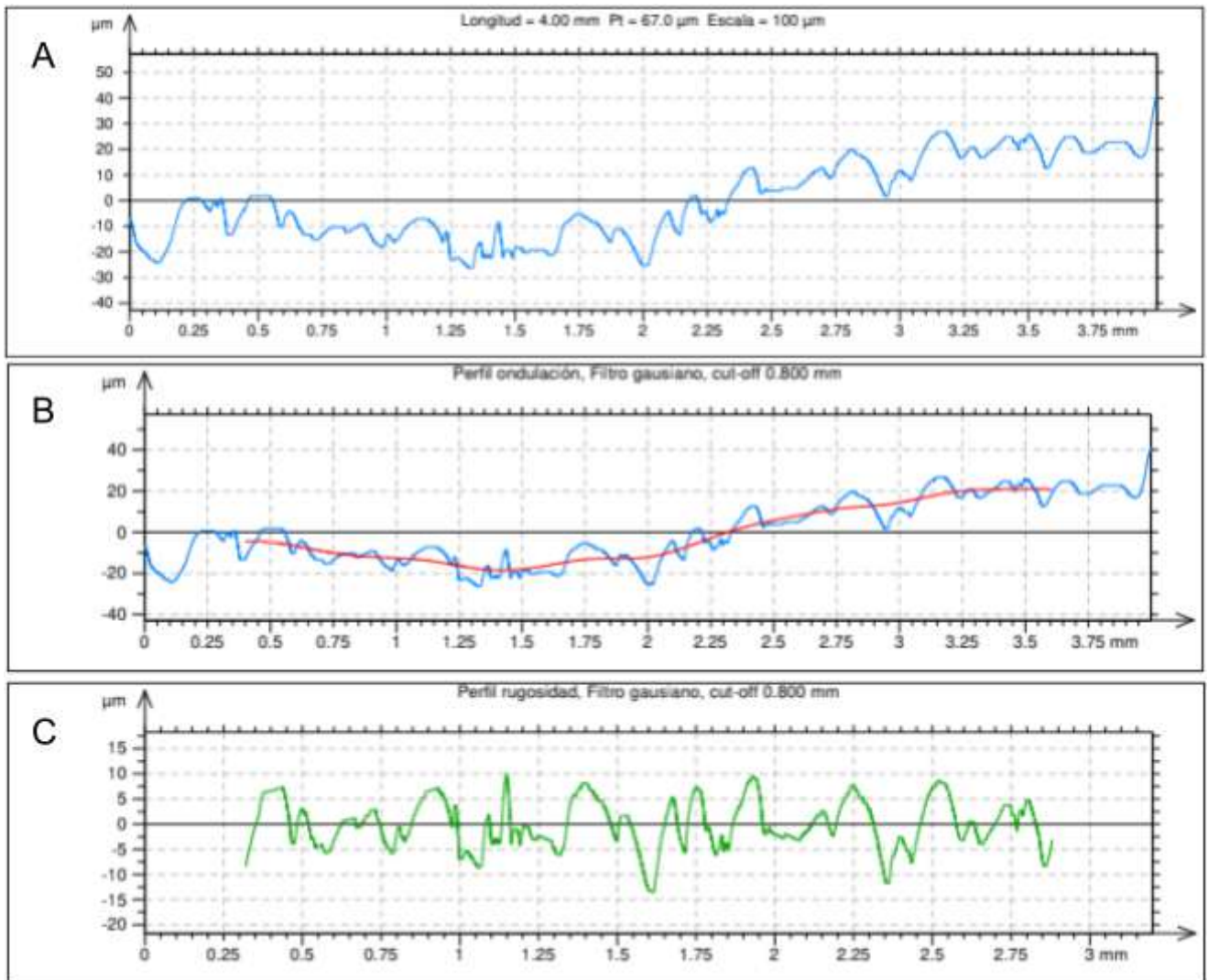


Figura 5.39. Perfil relevado de probeta de acero inoxidable (I3) EDM con potencia m3xima. A. Perfil primario. B. Perfil de ondulaci3n. C. Perfil de rugosidad.

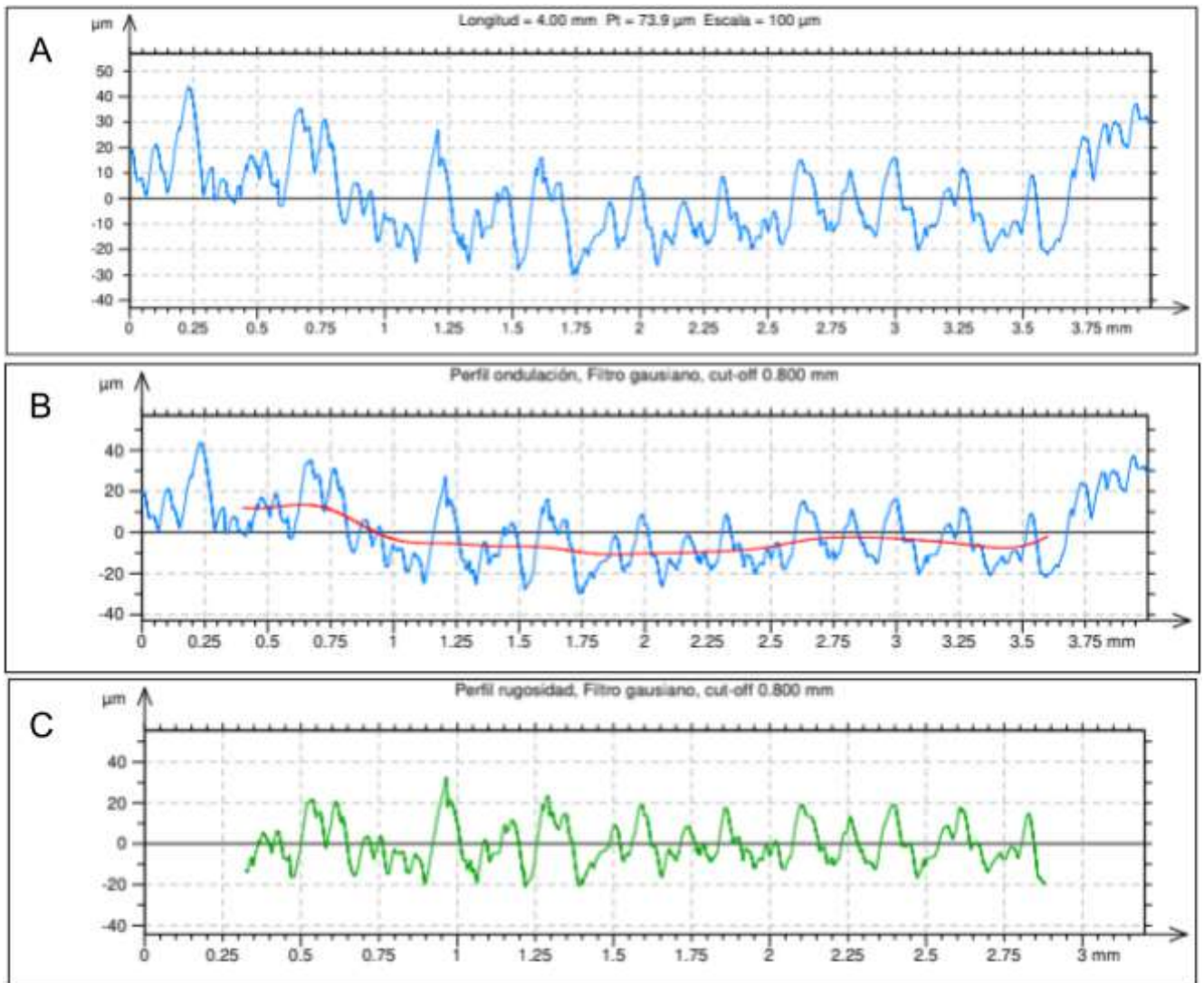


Figura 5.40. Perfil relevado de probeta de aleación de titanio (1S) WEDM con potencia intermedia. A. Perfil primario. B. Perfil de ondulación. C. Perfil de rugosidad.

En la Tabla 5.2, se presentan las mediciones de rugosidad de las probetas de acero inoxidable electroerosionadas por penetración (EDM). Las superficies de partida fueron pulidas manualmente con lija #500 ($R_a = 0,25 \mu\text{m}$).

La superficie I2 fue generada por EDM con polaridad directa, es decir que actuó como electrodo. Al no haber cambios significativos en la superficie, no se midió la rugosidad.

Comparando la rugosidad medida entre las probetas I2' e I3-I3', se observa que hay una gran diferencia en todos los parámetros presentados. A pesar de la utilización del mismo nivel de potencia, el dieléctrico usado influye significativamente en la superficie generada, coherente con lo visto en las imágenes tomadas con microscopio (Figuras 5.8 y 5.10). Sin embargo, la ondulación resultó mayor en la superficie generada en agua destilada. Es conveniente, entonces, el uso de kerosene como dieléctrico si se busca una mayor tasa de remoción de material para un mismo nivel de potencia.

Entre las probetas I3-I3' e I4, donde se utilizó el mismo dieléctrico pero se usaron diferentes potencias, se observa que Ra es menor con un nivel de potencia 2. Es decir que, utilizando una mayor densidad de corriente, la rugosidad es mayor. Se observó la misma tendencia en las imágenes presentadas anteriormente (Figuras 5.10 y 5.12). En el parámetro medido de ondulación, la diferencia resulta ser contraria, es menor cuando se utiliza mayor densidad de corriente. Si bien al aumentar el nivel de potencia se produce un aumento en la tasa de remoción, la calidad de la superficie se ve disminuida.

PROBETA	NIVEL DE POTENCIA	DIELÉCTRICO	Cupla	Ra promedio [μm]	Dispersión Ra [μm]	Rt promedio [μm]	Dispersión Rt [μm]	Wt promedio [μm]	Dispersión Wt [μm]
I2	5	Agua destilada	316L-Cu (electrodo)	-	-	-	-	-	-
I2'	5	Agua destilada	316L-Cu	0,37	una sola medida	2,81	una sola medida	57,8	una sola medida
I3 - I3'	5	Kerosene	316L-Cu	4,33	0,72	26,62	3,49	37,6	9,8
I4	2	Kerosene	316L-Cu	2,49	0,08	16,70	0,14	113	4,2

Tabla 5.2. Mediciones de rugosidad en probetas electroerosionadas de acero inoxidable 316L.

Las mediciones de rugosidad tomadas de las probetas de aleación de titanio electroerosionadas por penetración (EDM) se presentan en la Tabla 5.3.

Comparando las superficies T1 y T2, la rugosidad Ra es levemente menor en la probeta que actuó como electrodo T2 (polaridad directa). Se observa la misma diferencia, aunque más acentuada, en el parámetro Rt. Esta diferencia evidencia cuantitativamente la conveniencia de emplear polaridad inversa para electroerosionar titanio.

Si se consideran las superficies de las muestras T1 y T5, se puede inferir que cambiando el electrodo por uno de cobre electrolítico, los parámetros Ra, Rt y Wt bajaron significativamente a los medidos en T1. Utilizando cobre electrolítico como electrodo, se obtiene una mejor calidad superficial con una mayor tasa de remoción.

Utilizando el mismo dieléctrico y electrodo, en la probeta T2' se utilizó un nivel de potencia 5 y la rugosidad aumentó casi el doble, tanto en Ra como en Rt. Se observa la misma tendencia en las imágenes tomadas con microscopio óptico (Figuras 5.15 y 5.16).

En las dos superficies siguientes (T4' y T4), se utilizó kerosene como dieléctrico. Se observa la misma tendencia de aumento de rugosidad cuando se usa un nivel de potencia mayor, aunque en menor porcentaje que en las superficies generadas en agua destilada.

Al igual que lo observado en las muestras de acero inoxidable, al utilizar un mayor nivel de potencia se obtiene una rugosidad promedio en el rango de la esperable para operaciones de desbaste [Machining Data Handbook Vol. 2, 1980]. Cuando se utiliza un nivel de potencia bajo, la rugosidad promedio obtenida corresponde al rango esperable para operaciones de acabado.

Comparando la rugosidad entre superficies electroerosionadas con el mismo nivel de potencia y diferente dieléctrico, se observa que entre T2' y T4, tanto Ra como Rt, son levemente mayores en la superficie electroerosionada con agua destilada. Entre T5 y T4', a un nivel de potencia 2, Ra es levemente mayor cuando se utiliza kerosene. Sin embargo, en el parámetro Rt, la diferencia es significativamente menor cuando el dieléctrico es agua destilada. Se concluye que el proceso es más eficiente cuando se utiliza agua destilada como dieléctrico ya que aumenta la tasa de remoción mientras que no hay grandes diferencias en la rugosidad obtenida.

PROBETA	NIVEL DE POTENCIA	DIELÉCTRICO	Cupla	Ra promedio [μm]	Dispersión Ra [μm]	Rt promedio [μm]	Dispersión Rt [μm]	Wt promedio [μm]	Dispersión Wt [μm]
T1	2	Agua destilada	Ti-Ti	4,54	0,28	33,3	3,54	121,5	14,9
T2	2	Agua destilada	Ti-Ti (electrodo)	3,59	0,97	22,17	4,21	92,0	4,5
T2'	5	Agua destilada	Ti-Cu	4,44	0,17	28,33	1,99	35,1	3,7
T4	5	Kerosene	Ti-Cu	3,28	0,33	27,17	3,82	38,5	2,9
T4'	2	Kerosene	Ti-Cu	2,65	0,46	22,33	3,07	41,2	10,4
T5	2	Agua destilada	Ti-Cu	2,45	0,57	15,13	4,82	38,8	23,6

Tabla 5.3. Mediciones de rugosidad en probetas electroerosionadas de Ti-6Al-4V.

En la Tabla 5.4, se presentan los datos de rugosidad medidos de las superficies de aleación de titanio generadas por electroerosión por hilo WEDM.

Los parámetros de rugosidad Ra y Rt medidos, en las superficies generadas con un mayor nivel de potencia (102), son los mayores en comparación con las demás superficies. Tanto Ra como Rt, disminuyen con la disminución de la potencia aplicada. Es decir que, los valores más bajos medidos corresponden a las superficies generadas con un nivel de potencia 105. Se observó la tendencia mencionada en las imágenes obtenidas con microscopio óptico.

Es interesante la diferencia medida de Ra y Rt entre las superficies generadas con nivel de potencia 103 y 104. En ambos parámetros, la rugosidad es más del doble en las superficies de mayor potencia (103). Entre las superficies generadas con niveles de potencia 102, 101 y 103, la disminución no fue tan significativa.

En conclusión, la rugosidad varía directamente con el nivel de potencia aplicado durante el ensayo. Entonces, al aumentar la potencia seleccionada, la tasa de remoción y el valor de la rugosidad Ra y Rt obtenidos aumentan.

PROBETAS	NIVEL DE POTENCIA	Ra promedio [μm]	Dispersión Ra [μm]	Rt promedio [μm]	Dispersión Rt [μm]	Wt promedio [μm]	Dispersión Wt [μm]
7I-8S-8I-9S	102	10,26	1,58	62,31	9,53	38,5	4,3
5I-6S-6I-7S	101	9,1	0,78	55,95	6,09	46,4	10,3
1S-1I-2S-9I	103	7,01	1,26	44,05	7,72	22,7	1,4
2I-3S-3I-4S	104	2,37	0,09	19,53	2,37	43,1	5,2
4I-5S	105	1,3	0,12	9,03	0,27	14,4	5,8

Tabla 5.4. Mediciones de rugosidad en probetas electroerosionadas por hilo de Ti-6Al-4V.

En la Tabla 5.5, se presentan los datos de rugosidad medidos de las superficies de acero inoxidable generadas por electroerosión por hilo (WEDM). No fue posible realizar el corte completo con un nivel de potencia 105 por la baja velocidad de ensayo. Por lo que, no se obtuvieron los datos de rugosidad.

Al igual que en las mediciones de rugosidad de las superficies de aleación de titanio, los mayores valores se obtuvieron en las superficies generadas con mayor potencia aplicada (102). A medida que disminuyó el nivel de potencia utilizado, disminuyeron los valores de los parámetros de rugosidad.

Se observa la misma diferencia significativa de rugosidad entre las superficies generadas con los niveles de potencia 103 y 104.

Con respecto al parámetro de ondulación, se observa el mayor valor para la superficie generada con el nivel más bajo de potencia medido (104).

Al igual que en los ensayos de aleación de titanio, la tasa de remoción y la rugosidad obtenida de la superficie aumentan con el aumento del nivel de potencia aplicado. Sin embargo, al utilizar una potencia muy baja el ensayo es extremadamente lento siendo inaplicable a nivel industrial.

PROBETAS	NIVEL DE POTENCIA	Ra promedio [μm]	Dispersión Ra [μm]	Rt promedio [μm]	Dispersión Rt [μm]	Wt promedio [μm]	Dispersión Wt [μm]
17I-18S-18I-19S	102	5,24	0,93	39,38	5,57	39,43	16,68
15I-16S-16I-17S	101	3,82	0,35	25,81	1,06	23,34	4,57
11S-11I-12S-19I	103	3,26	0,23	27,92	2,44	36,12	3,13
12I-13S-13I-14S	104	1,3	0,08	9,06	0,59	50,06	13,34
14I-15S	105	-	-	-	-	-	-

Tabla 5.5. Mediciones de rugosidad en probetas electroerosionadas por hilo de acero inoxidable 316L.

Es interesante comparar los valores de rugosidad de las superficies generadas por WEDM en los dos materiales ensayados. La rugosidad Ra en acero inoxidable es casi la mitad en todos los niveles de potencia en comparación a las superficies de titanio. Se concluye que el

proceso de WEDM en acero inoxidable tiene una mayor velocidad de corte, en las potencias intermedias y altas, en estas condiciones permite obtener una mejor terminación superficial.

5.2.3. Alteraciones en la dureza

Los resultados de microdureza Knoop obtenidos de las muestras electroerosionadas se detallan en la Tabla 5.6, con una carga aplicada de 200 p, 100 p y 50 p.

La carga seleccionada depende del tamaño del lugar donde se indentó. En la mayoría de las superficies se realizaron improntas en las zonas pulidas de material, aunque se encontraron en algunas probetas sectores óptimos para medir dureza en las zonas sin pulir. En las Figuras 5.41, 5.42 y 5.43, se observan las indentaciones realizadas en diferentes aumentos.

Probeta	Material	Superficie	Pounds	Borde		Centro	
				Promedio	Dispersión	Promedio	Dispersión
Ti bulk	Ti-6Al-4V	Pulida	200			383,67	18,14
T4	Ti-6Al-4V	EDM	200	891,2	-	2392	98,99
T2'	Ti-6Al-4V	EDM	200	1138	0	1540	-
3S	Ti-6Al-4V	WEDM	200	393,8	-		
			100			719	22,91
7I	Ti-6Al-4V	WEDM	100			1003,43	363,99
316L bulk	316L	Pulida	200			352,15	33,58
I3'	316L	EDM	200	480	-	1250,33	252,96
13S	316L	WEDM	100			324,3	10,32
			50			408	25,94
17I	316L	WEDM	100			207,78	39,45
			50			265,7	3,63

Tabla 5.6. Mediciones de dureza en probetas EDM y WEDM de acero inoxidable 316L y de Ti6Al4V.

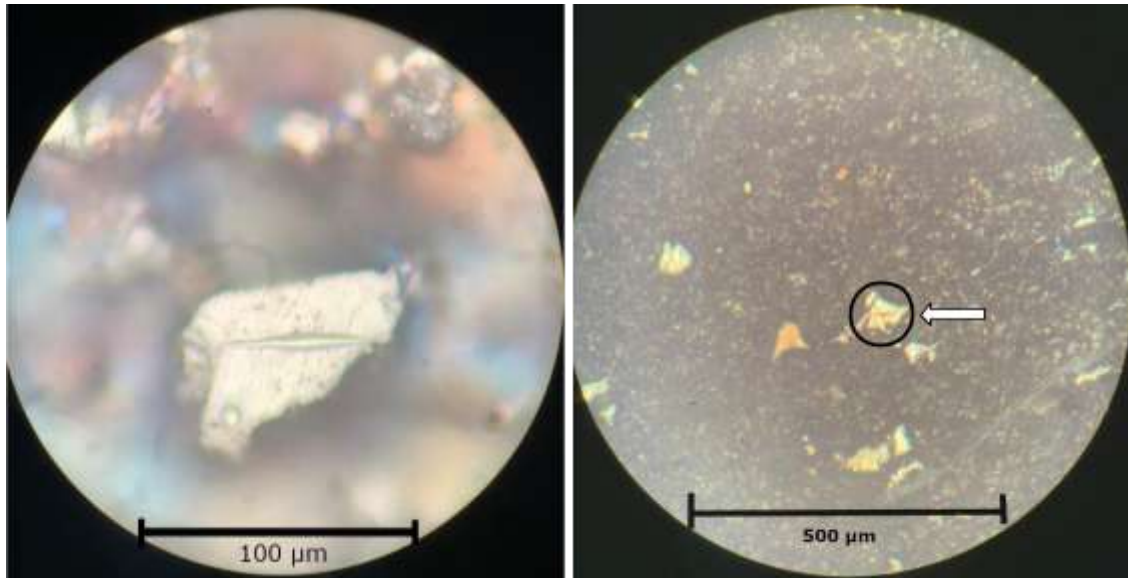


Figura 5.41. Imágenes de microscopio óptico a 50x (izquierda) y 10x (derecha) de probeta WEDM de Ti6Al4V (7I) con un nivel de potencia 102.

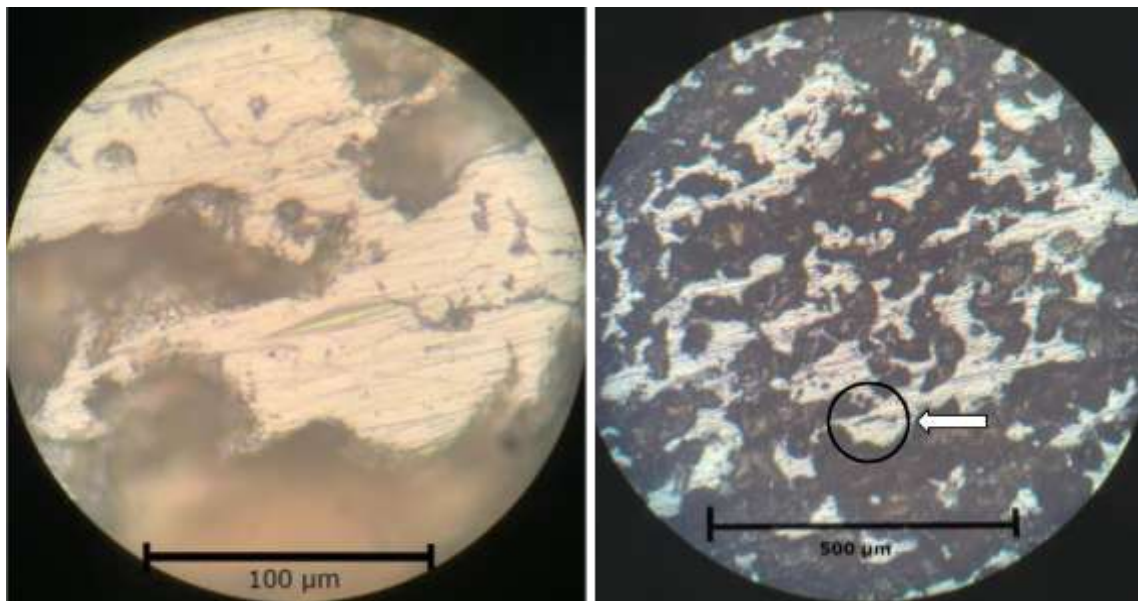


Figura 5.42. Imágenes de microscopio óptico a 50x (izquierda) y 10x (derecha) de probeta WEDM de acero inoxidable (17I) con un nivel de potencia 102.

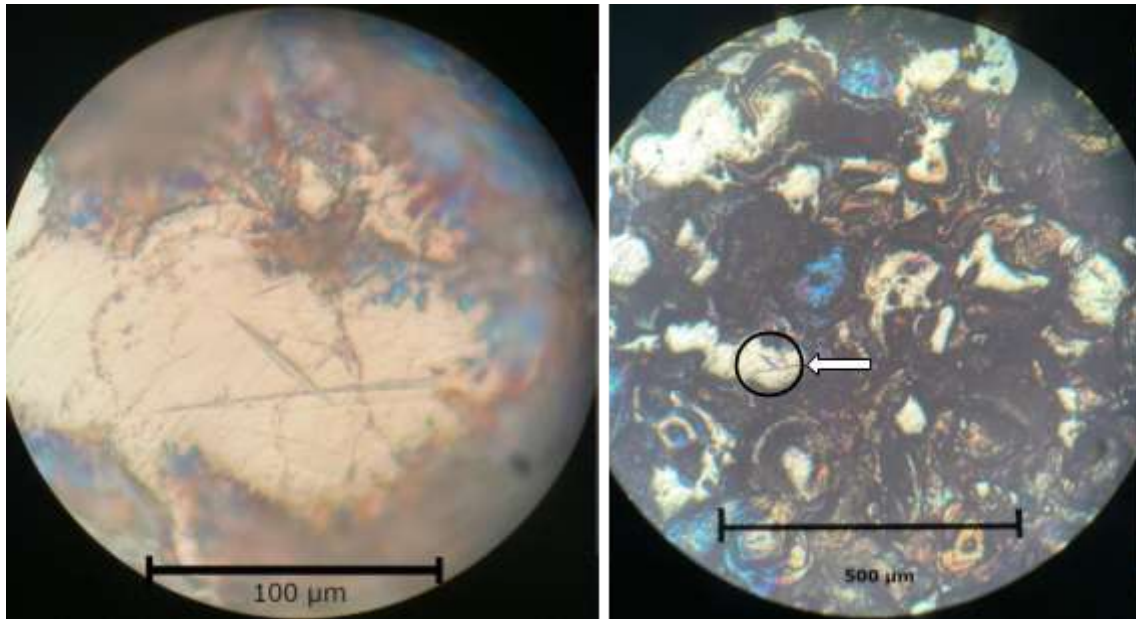


Figura 5.43. Imágenes de microscopio óptico a 50x (izquierda) y 10x (derecha) de probeta EDM de Ti6Al4V (T2') con un nivel de potencia 5 (H₂O), con electrodo de cobre electrolítico y polaridad indirecta.

Es interesante destacar el gradiente de microdureza obtenido en la probeta 7I, obtenida por WEDM a máxima potencia. La Figura 5.44 corresponde a un croquis donde se observa el procedimiento realizado al tomar las mediciones de microdureza Knoop. La superficie transversal fue cortada mediante el proceso de WEDM. Como se mencionó en el apartado 4.6, por el método de sujeción, visualmente se colocó a $90^{\circ} \pm 1^{\circ}$ respecto del eje de la varilla, lo que genera que la superficie transversal no sea perpendicular al eje de la varilla. Durante la medición de microdureza, se procedió a pulir manualmente con lija #1000 para generar islas donde se pudiera medir la indentación Knoop. Las sucesivas capas de material removidas por pulido manual se presentan en el croquis de la Figura 5.44. Se tomaron diferentes valores de microdureza Knoop con una amplia diferencia.

En el gráfico de la Figura 5.45, se observa que la dureza más alta corresponde a una capa más superficial, donde se encontraban óxidos generados durante el ensayo de EDM. Mientras que las durezas más bajas corresponden a las zonas donde el pulido barrió la mayor parte de la zona afectada, pero aún presenta cambios en la microestructura de material.

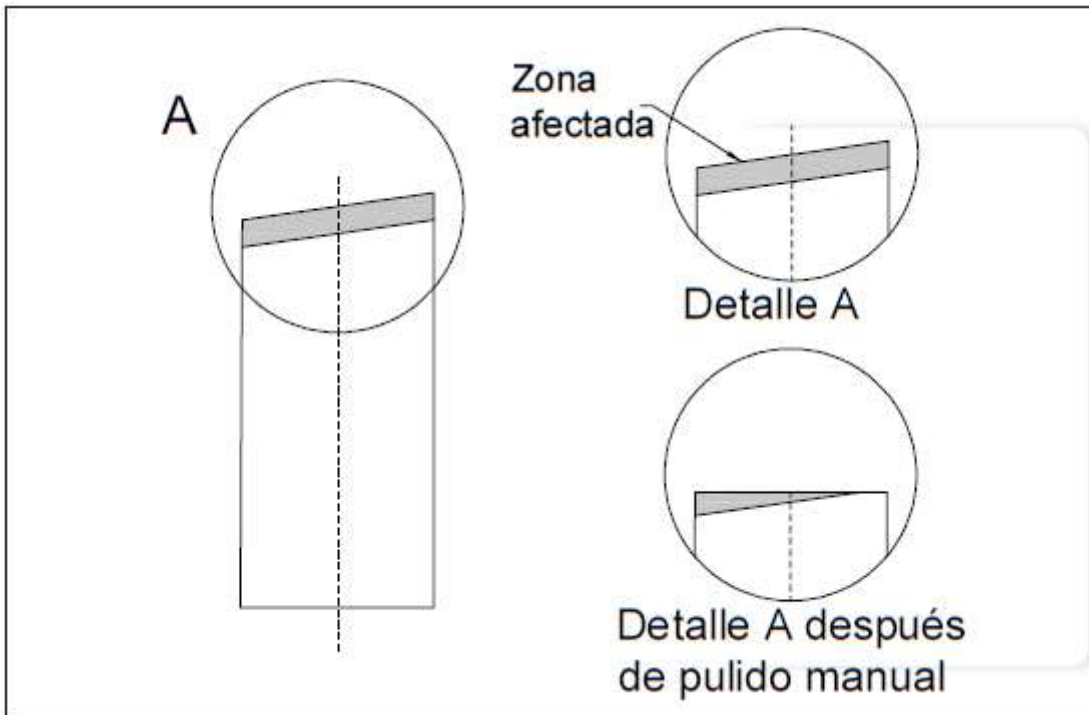


Figura 5.44. Croquis de las capas donde se realizó la medición de microdureza Knoop.

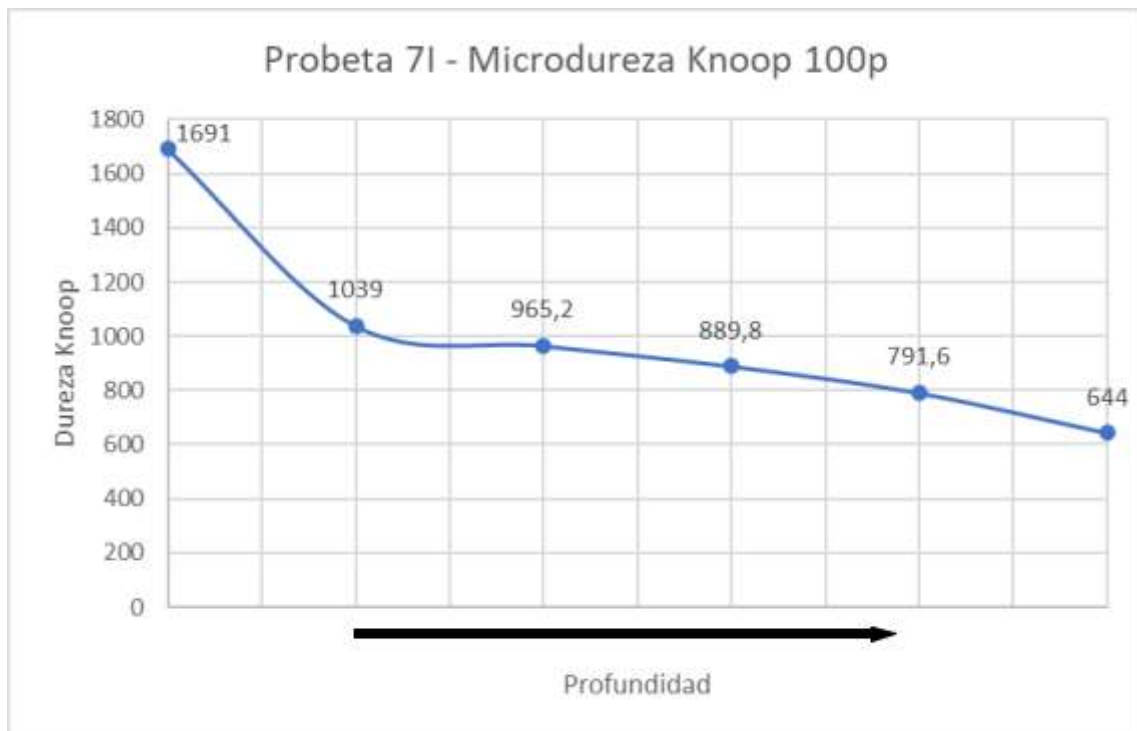


Figura 5.45. Mediciones de microdureza Knoop (100p) en probeta 71.

En las superficies T4 y T2', se pueden observar microdurezas muy altas. Se concluye que, durante el proceso de EDM a máxima potencia, se formaron óxidos. Sin embargo en la

superficie 3S que fue generada por WEDM a baja potencia, no correspondería a la formación de óxidos sino a una modificación en la microestructura dado que el aumento de microdureza no es tan significativo.

En la probeta 17I de acero inoxidable que fue generada por WEDM a máxima potencia, se observa una disminución en la dureza. En la bibliografía [Machining Data Handbook Vol. 2, 1980], se observó que es posible encontrar cambios en la microestructura que disminuyan la dureza respecto del material base. Por las altas temperaturas que se requieren para la fusión y remoción del material de la superficie, se puede producir un cambio significativo en el contenido de aleantes lo que producirá este cambio en el material. En la bibliografía, a esta zona afectada por el calor se la llama capa blanca.

En la superficie de acero inoxidable I3', superficie EDM generada a máxima potencia, la dureza en el centro de la probeta se puede atribuir a la formación de óxidos durante la electroerosión. Sin embargo, la superficie 13S obtenida por WEDM a mínima potencia no muestra cambios al material base.

5.3. Fabricación de dispositivo para ensayos de electropulido

Se plantea modificar por electropulido la superficie que fue previamente generada por EDM o WEDM. Esta es una cara plana perpendicular al eje de revolución de la probeta. Este ensayo requiere que la cara a tratar esté en contacto con el electrolito, pero el resto de las superficies de la probeta no debe hacerlo.

Fue necesario la fabricación de un accesorio para la correcta sujeción de las probetas (superficie enfrentada al cátodo), asegurar el contacto eléctrico y la hermeticidad.

El dispositivo se fabricó a partir de dos barras de APM (Figuras 5.46 y 5.47): una de 30 mm de diámetro y la segunda de 15 mm de diámetro, disponibles en el taller de máquinas herramienta de la Facultad de Ingeniería. La selección del APM se basa en que no interfiere en el proceso de electropulido y no es atacado por el electrolito, los cuales son generalmente ácidos o soluciones ácidas.

Para asegurar el contacto eléctrico, se utilizaron dos resortes de lapicera de 4 mm de diámetro y papel aluminio, como se observa en la Figura 5.48. El dispositivo se realizó en dos piezas distintas para poder armar, desarmar y limpiar los componentes internos (resortes y papel aluminio). Además, la unión mediante rosca permite comprimir los resortes y así asegurar el contacto con la probeta.

Se adoptó una longitud total de 82 mm para facilitar el armado del set up y que no sea necesario un alto nivel de líquido en el recipiente. Se realizó una superficie plana mediante una operación de contorneado en fresadora, para que la superficie a electropulir se posicione al ras y no interfirieran los laterales cilíndricos en el ensayo.

La hermeticidad se garantizó con el diseño del dispositivo, realizando en el lado fresado una superficie cónica con una broca (Figura 5.46, detalle B) e insertando a presión la probeta. Del otro lado, el agujero es de mayor diámetro para que tenga juego deslizante con la probeta y se cubrió con cinta aisladora para sellarlo, ya que ésta no es atacada por el electrolito.

En la pieza superior del dispositivo, se mecanizaron dos agujeros paralelos entre sí de 3,5 mm de diámetro, por los que pasan varillas de aluminio. Estas varillas, como se mencionó en la metodología, permitieron posicionar a una misma distancia, en todos los ensayos, el cátodo y el ánodo. Además, las varillas le confieren estabilidad al dispositivo.

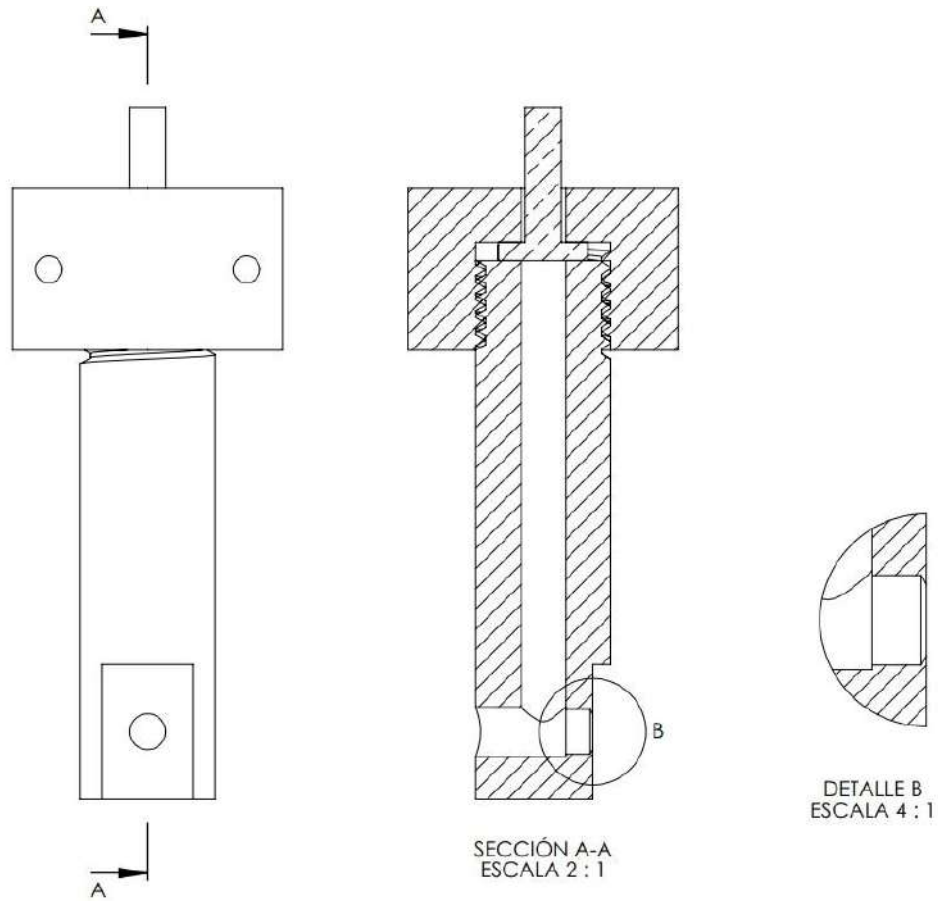


Figura 5.46. Plano del accesorio porta-probetas para electropulir.

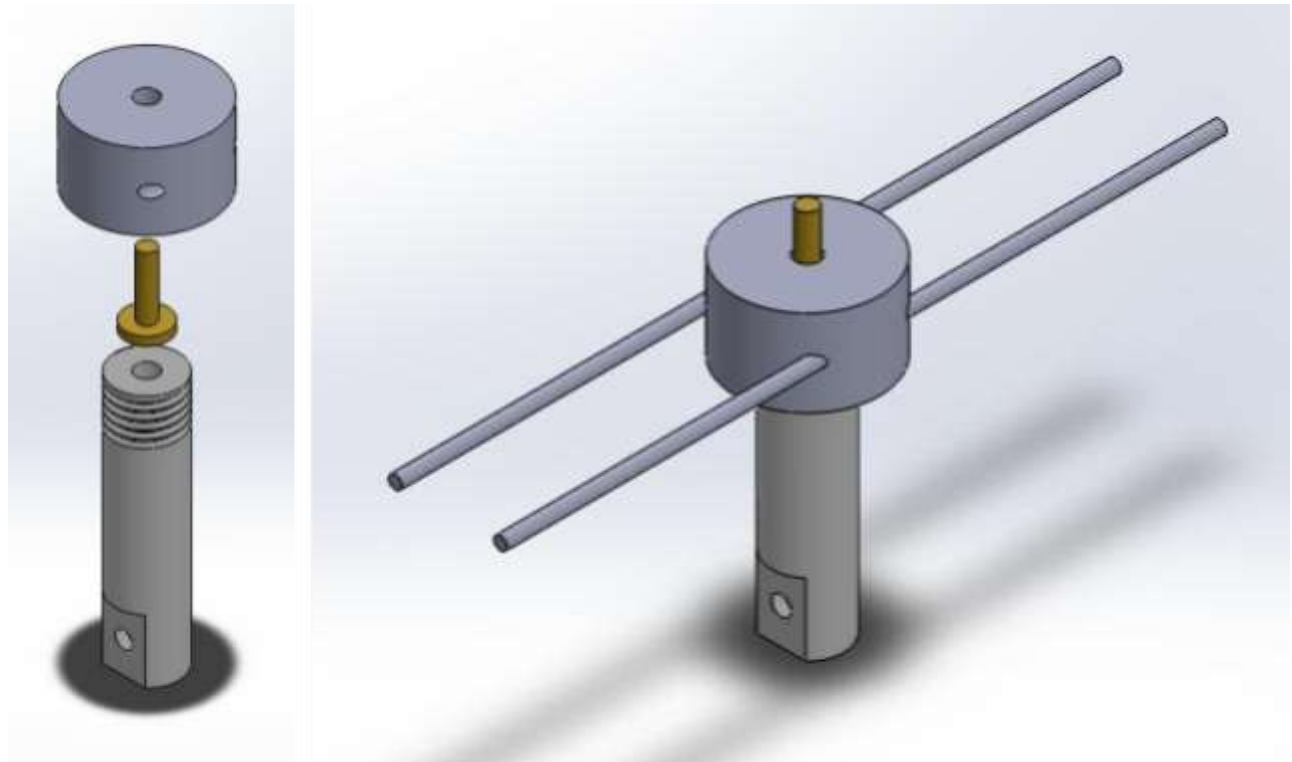


Figura 5.47. Croquis 3D del accesorio porta-probetas para electropulir.



Figura 5.48. Imagen del accesorio porta-probetas para electropulir.

5.4. Electropulido en probetas de acero inoxidable

5.4.1. Puesta a punto

Ensayo 1

Se verificó el correcto funcionamiento del electrolito con una chapa de acero inoxidable AISI 316L utilizada en un trabajo final previo.

Se electropulíó con una densidad de corriente de $0,42 A/cm^2$ (Ensayo 1.1) y otra de $0,84 A/cm^2$ (Ensayo 1.2) durante 15 minutos, interrumpiendo el ensayo cada 5 minutos para controlar el avance y cuantificar la rugosidad, en ambas condiciones.

$$\delta_{6.1} = 0,42 A/cm^2, A = 4,77 cm^2 \Rightarrow I_{6.1} = 2 A$$

$$\delta_{6.2} = 0,84 A/cm^2, A = 4,77 cm^2 \Rightarrow I_{6.2} = 4 A$$

En la Tabla 5.7, se muestran las mediciones de rugosidad Ra de ambos ensayos cada 5 minutos. La rugosidad Ra previa a los ensayos resultó de $0,322 \mu m$.

Tiempo [min]	Ensayo 1.1 [μm]	Dispersión [μm]	Ensayo 1.2 [μm]	Dispersión [μm]
5	0,281	0,000	0,198	0,057
10	0,265	0,028	0,136	0,006
15	0,236	0,006	0,132	0,000

Tabla 5.7. Ra medido en superficies electropulidas de acero inoxidable con densidad de corriente $0,42 A/cm^2$ (ensayo 1.1) y $0,84 A/cm^2$ (ensayo 1.2).

De esta forma, se verificó que el electrolito genere los resultados esperados. Como se ve en la Figura 5.49, se electropulieron ambos extremos de la chapa, con las dos densidades de corriente mencionadas. En ambos extremos, se observó un buen resultado del proceso con terminación especular.

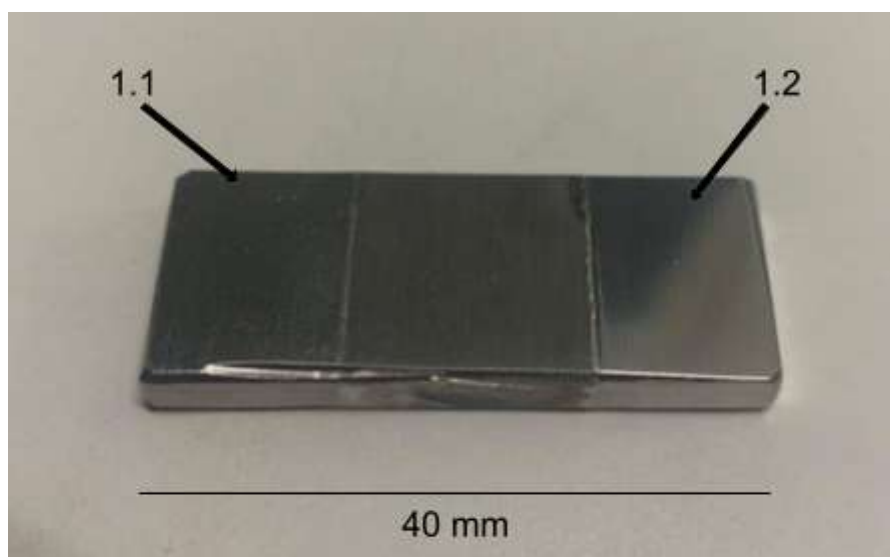


Figura 5.49. Puesta a punto del ensayo de electropulido en chapa de acero inoxidable.

Durante el ensayo 1.2 y se observaba que la temperatura aumentaba considerablemente. Se detuvo el ensayo a los 4 minutos para colocar el recipiente con el electrolito dentro de otro con agua a temperatura ambiente. Se prosiguió el ensayo hasta los 15 minutos. En la Figura 5.50, se muestra el aumento de temperatura durante el ensayo.

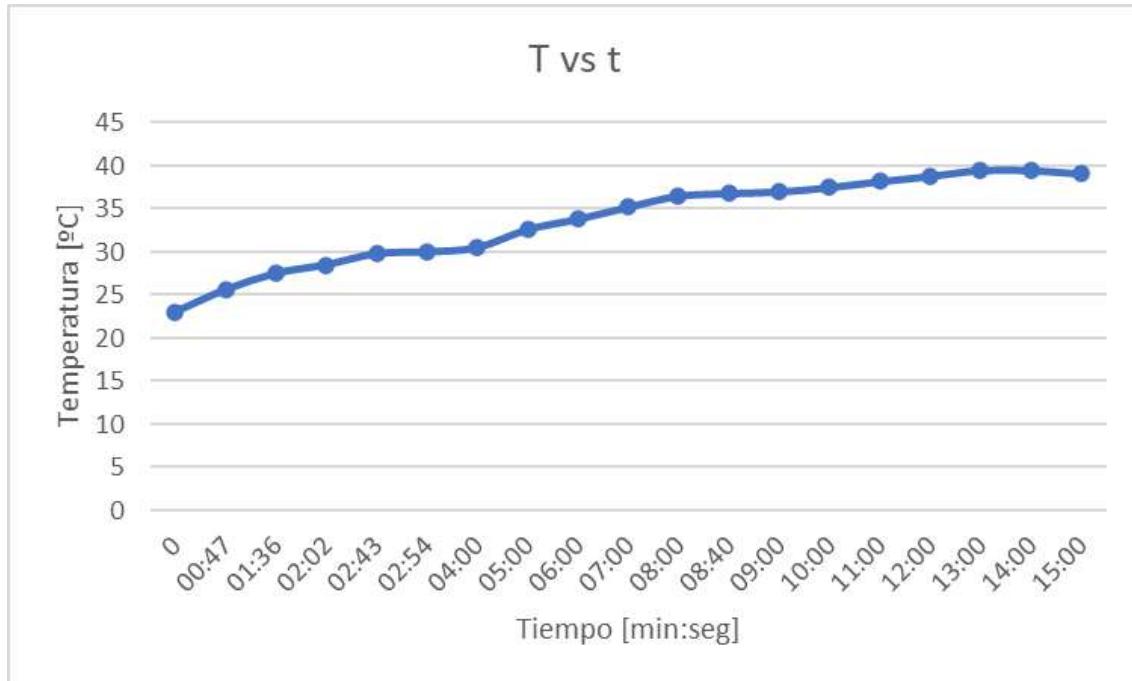


Figura 5.50. Temperatura del electrolito durante el ensayo de electropulido.

Ensayo 2

Una vez verificado el correcto funcionamiento del electrolito, se prosiguió a poner a punto el ensayo. Se utilizó una probeta de acero inoxidable 316L obtenida de la varilla disponible y de las mismas dimensiones que las probetas a electropulir posteriormente. Se empleó el dispositivo fabricado (Figura 5.48) para que la superficie a electropulir se encuentre enfrentada al cátodo. La superficie de la muestra ensayada fue pulida manualmente con lija #500. Se utilizaron las condiciones de ensayo de un trabajo previo [Carro, 2019] con una densidad de corriente intermedia a las utilizadas en el ensayo 1.

$$\delta = 0,6 A/cm^2, A = 0,196 cm^2 \Rightarrow I = 0,1178 A$$

Tiempo de ensayo =15 minutos.

El resultado no fue el esperado, ya que la superficie se observaba opaca.

Se pulió la superficie electropulida con lija #500 y se repitió el ensayo para verificar el resultado obtenido previamente.

Se obtuvo el mismo resultado, es decir, una superficie opaca. Al observar en microscopio óptico, la superficie no presentaba ningún rayado, es decir que el electropulido borró la superficie pulida. Sin embargo, se observó picado. Además, la rugosidad aumentó luego del electropulido.

Ensayo 3

Al observar el resultado obtenido en la superficie plana de la varilla, se buscó analizar si en la superficie cilíndrica de la varilla sucedía lo mismo. Se utilizó el mismo área expuesta que en la chapa electropulida en el ensayo 1. El ensayo se llevó a cabo durante 15 minutos, interrumpiéndolo a 1, 2 y 5 minutos.

$$\delta = 0,84 \text{ A/cm}^2, A = 4,77 \text{ cm}^2 \Rightarrow I = 4 \text{ A}$$

La varilla se sujetó igual que el cátodo, mediante pinzas, como se muestra en la Figura 5.51.



Figura 5.51. Set up del ensayo de electropulido. Sujeción del cátodo y ánodo.

En el primer minuto del ensayo interrumpido, la superficie cilíndrica se pulió aunque todavía se observaban las marcas de pulido manual. Al segundo minuto, la superficie ya presentaba un sobreataque. Se observó el mismo sobreataque para 5 minutos y 15 minutos. La superficie resultó opaca.

Ensayo 4

Se optó por reducir a la mitad la intensidad de corriente, siendo las condiciones de ensayo:

$$\delta = 0,42 \text{ A/cm}^2, A = 4,77 \text{ cm}^2 \Rightarrow I = 2 \text{ A}$$

Y la rugosidad inicial $Ra = 0,33 \mu m$, obtenida mediante un pulido manual con lija #220.

La superficie, luego del primer minuto de ensayo, no presentó cambios visibles. Sin embargo, Ra aumentó a $0,43 \mu m$.

Luego del segundo minuto, la rugosidad bajó a $0,28 \mu m$. Se electropulíó un minuto más y la rugosidad volvió a aumentar, llegando a $0,32 \mu m$.

Ensayo 5

En la bibliografía se encontró un trabajo referido al electropulido de AISI 316L utilizando el mismo electrolito que en el presente trabajo [Rotty et al, 2016], en el que a temperatura ambiente se obtuvo la misma superficie sobreatacada que en los ensayos previos de puesta a punto. Sin embargo, al realizar el electropulido a $70^{\circ}C$ se obtuvieron buenos resultados. Por lo que se optó por aumentar la temperatura de ensayo. Cabe mencionar que los ensayos previos se habían realizado a temperatura ambiente.

En la Figura 5.52, se muestran las curvas de densidad de corriente en función de la tensión para temperatura ambiente ($20^{\circ}C$) y para $70^{\circ}C$. Puede verse que para el mismo voltaje aplicado, la densidad de corriente aumenta con el aumento de la temperatura del electrolito.

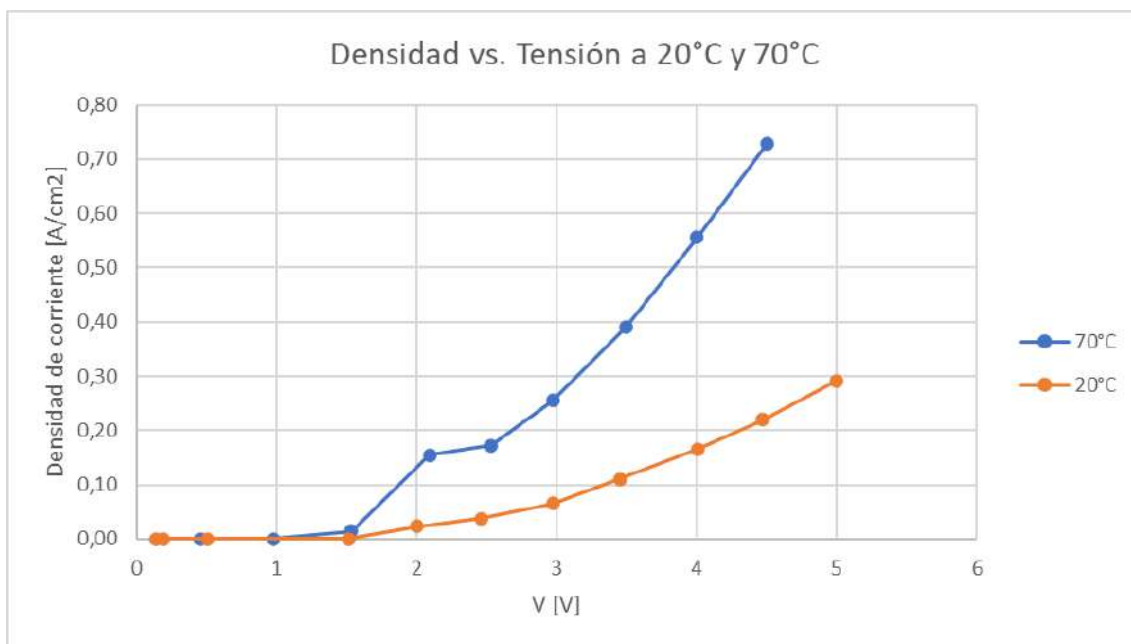


Figura 5.52. Relevamiento de la densidad de corriente en función de la tensión a $20^{\circ}C$ y $70^{\circ}C$, en varilla de acero inoxidable.

Se realizó el ensayo en alta temperatura y densidad de corriente $0,42 A/cm^2$, utilizando la varilla de acero inoxidable como probeta. Se pulió manualmente con lija #280. Se electropulíó durante 15 minutos, interrumpiendo el ensayo a los 8 minutos para mantener la temperatura en $70^{\circ}C$.

El resultado en los laterales de la varilla fue bueno, es decir, se electropulieron. Sin embargo, en la base de la varilla no se encontraron los resultados esperados. La imagen de la Figura 5.53 se tomó de la base de la varilla mediante microscopio óptico con 10 aumentos. Se observó una superficie sobreatacada.

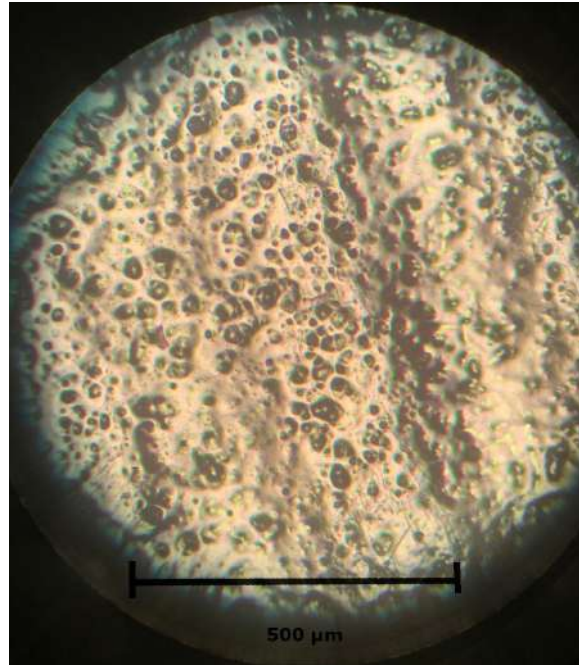


Figura 5.53. Electropulido durante 15 minutos en la base de varilla de acero inoxidable, imagen tomada en microscopio óptico 10x.

Se optó por probar el ensayo con la superficie enfrentada al cátodo, usando el dispositivo de APM, durante 5 minutos. Se utilizó la misma densidad de corriente y misma temperatura que en el ensayo anterior.

El resultado tampoco fue el esperado. Se observaron depósitos sobre la muestra y una superficie sobreatacada. La superficie se muestra en las Figuras 5.54 y 5.55 tomadas con microscopio óptico con 10 y 50 aumentos. Se observa una superficie irregular. A altos aumentos, se observan dos zonas con características muy distintas que hacen foco a diferente profundidad. La primera corresponde a una textura atenuada similar a la obtenida mediante un electropulido correcto. La segunda textura resultó ser más opaca, lo que indica un sobreataque.

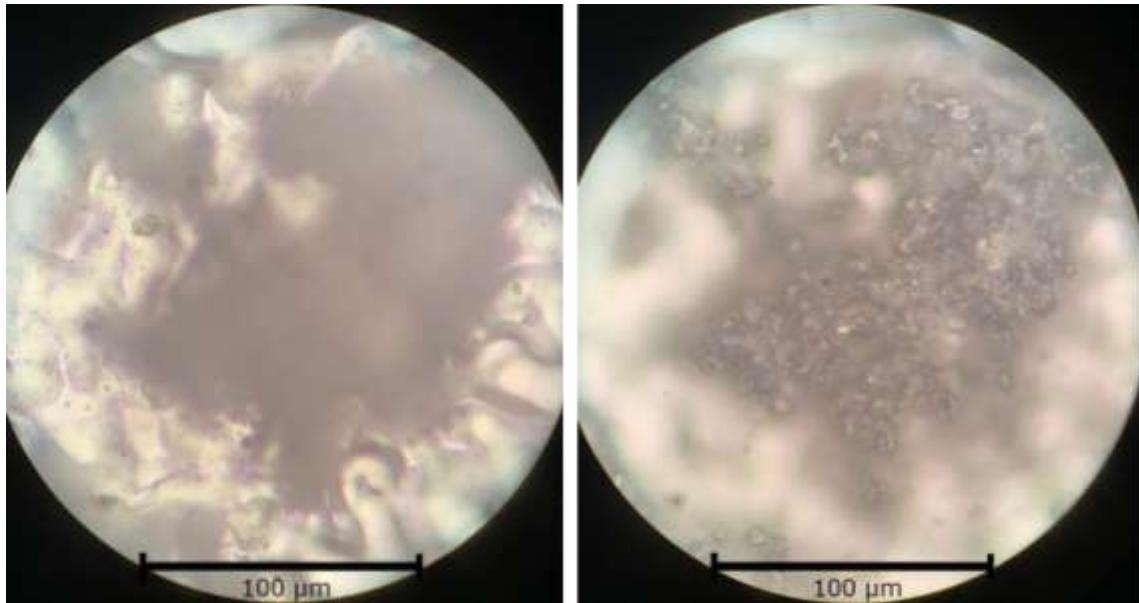


Figura 5.54. Electropulido durante 5 minutos en probeta de acero inoxidable, imagen tomada en microscopio óptico 50x.

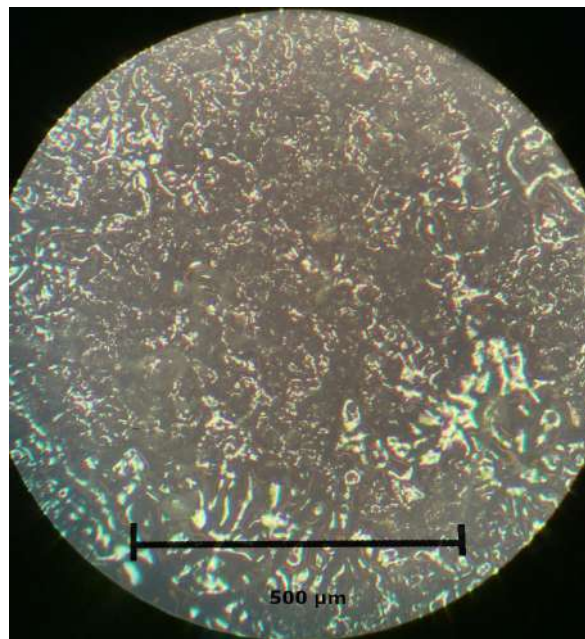


Figura 5.55. Electropulido durante 5 minutos en probeta de acero inoxidable, imagen tomada en microscopio óptico 10x.

5.4.2. Realización del ensayo

Teniendo en cuenta los resultados de los ensayos de puesta a punto, las condiciones del ensayo de electropulido son las siguientes:

$$\delta = 0,4 A/cm^2, A = 0,196 cm^2 \Rightarrow I = 0,0785 A$$

Tiempo de ensayo = 2 minutos.

Temperatura ambiente, 20°C.

Estas condiciones corresponden a las utilizadas en el Ensayo 4. Las probetas a electropulir son las mencionadas en la Tabla 5.8.

Probeta	Mecanizado previo	Nivel de potencia	Dieléctrico	Electrodo
12S	WEDM	103	118	Mo
16S	WEDM	101	118	Mo
18S	WEDM	102	118	Mo
I3	EDM	5	Kerosene	Cu

Tabla 5.8. Superficies a electropulir con el mecanizado previo y sus condiciones de ensayo.

Se seleccionaron las superficies con mayor rugosidad, por lo que las condiciones de electroerosión de las probetas seleccionadas son las de mayor potencia en los ensayos.

5.4.3. Topografía superficial

5.2.3.1. Imágenes obtenidas en microscopio óptico

Probeta 12S:

La Figura 5.56 muestra imágenes tomadas con microscopio óptico antes y después del electropulido. Previamente, la superficie fue electroerosionada por hilo con un nivel de potencia 103. Luego del electropulido, no se observaron cambios significativos en la superficie, la cual se tornó más dorada luego del proceso. El material redepositado mantuvo la forma previa.

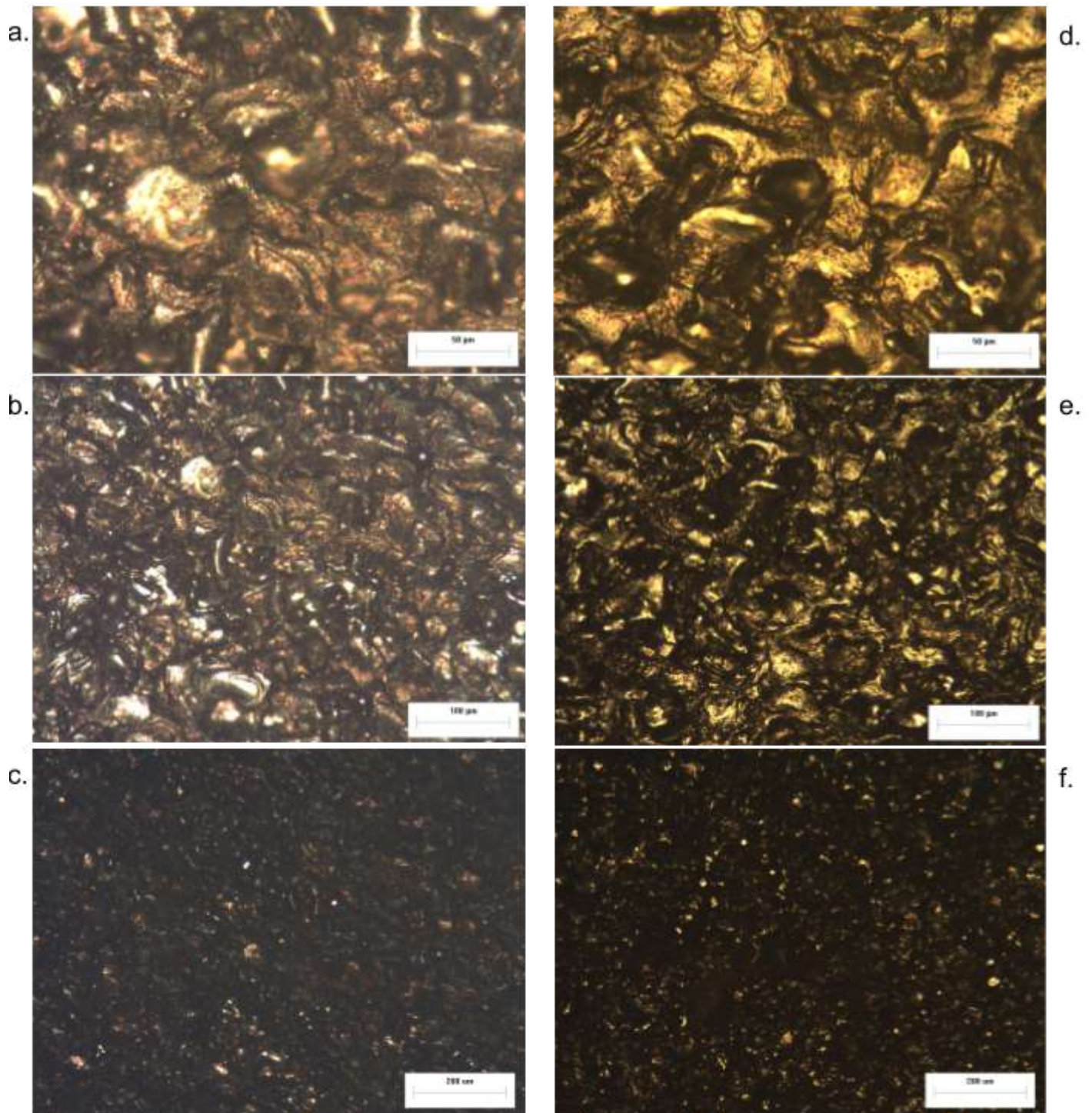


Figura 5.56. Superficie de probeta de acero inoxidable (12S) electroerosionada por hilo con nivel de potencia 103, imagen tomada en microscopio óptico: a. 20x, b. 10x, c. 5x y posteriormente electropulida: d. 20x, e. 10x, f. 5x.

Probeta 16S:

En la Figura 5.57 se observan las imágenes tomadas con microscopio óptico antes y después del electropulido. El mecanizado previo corresponde a WEDM con un nivel de potencia 101. Luego del electropulido, no se observaron cambios significativos en las

imágenes de la superficie. La superficie se tornó más dorada luego del proceso. El material redepositado mantuvo la forma previa.

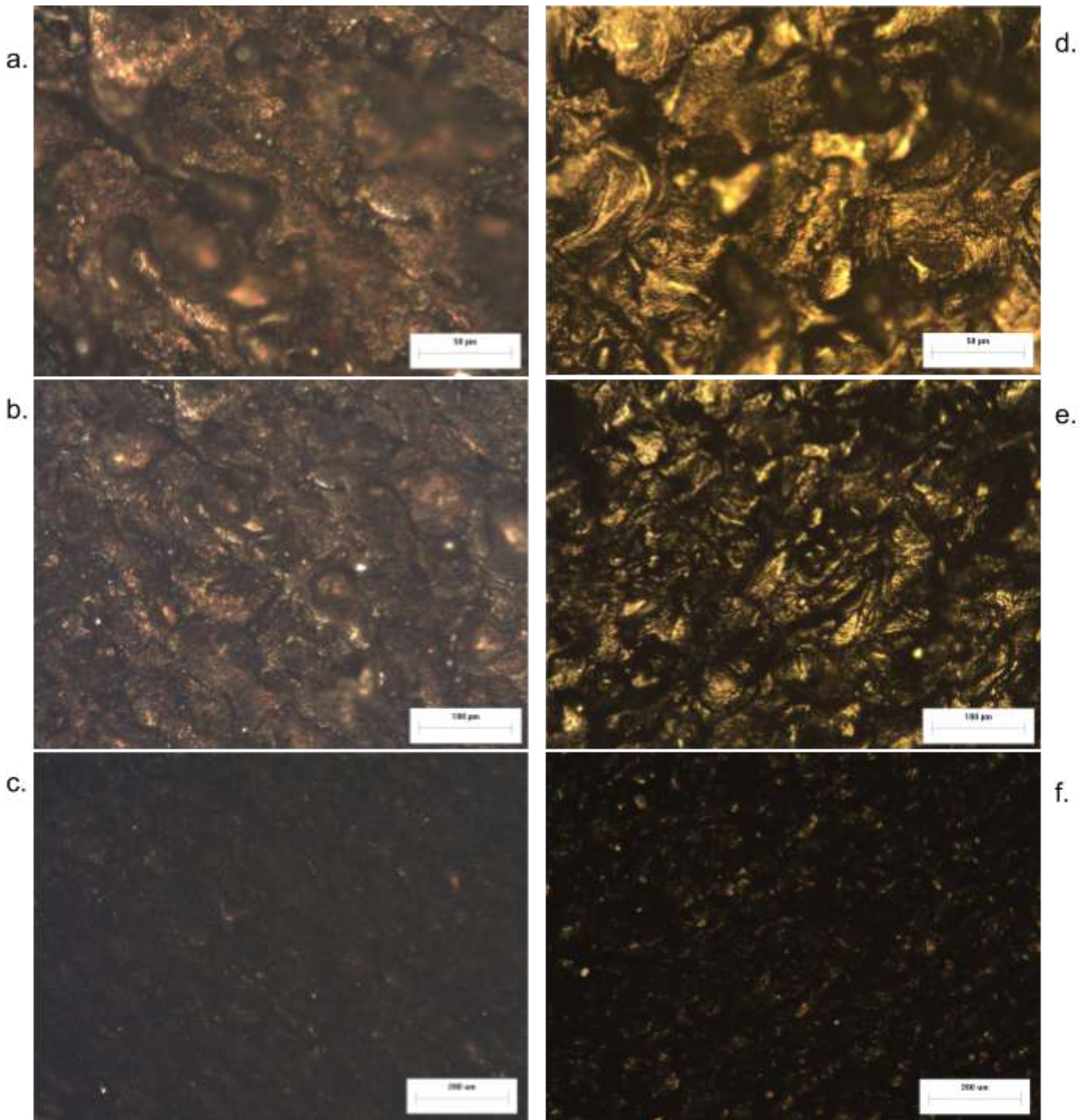


Figura 5.57. Superficie de probeta de acero inoxidable (16S) electroerosionada por hilo con nivel de potencia 101, imagen tomada en microscopio óptico: a. 20x, b. 10x, c. 5x y posteriormente electropulida: d. 20x, e. 10x, f. 5x.

Probeta 18S:

La Figura 5.58 muestra imágenes tomadas con microscopio óptico antes y después del electropulido. Previamente, la superficie fue electroerosionada por hilo con un nivel de potencia 102. Luego del electropulido, no se observaron cambios significativos en la superficie. Además, el material redepositado mantuvo la forma y tamaño.

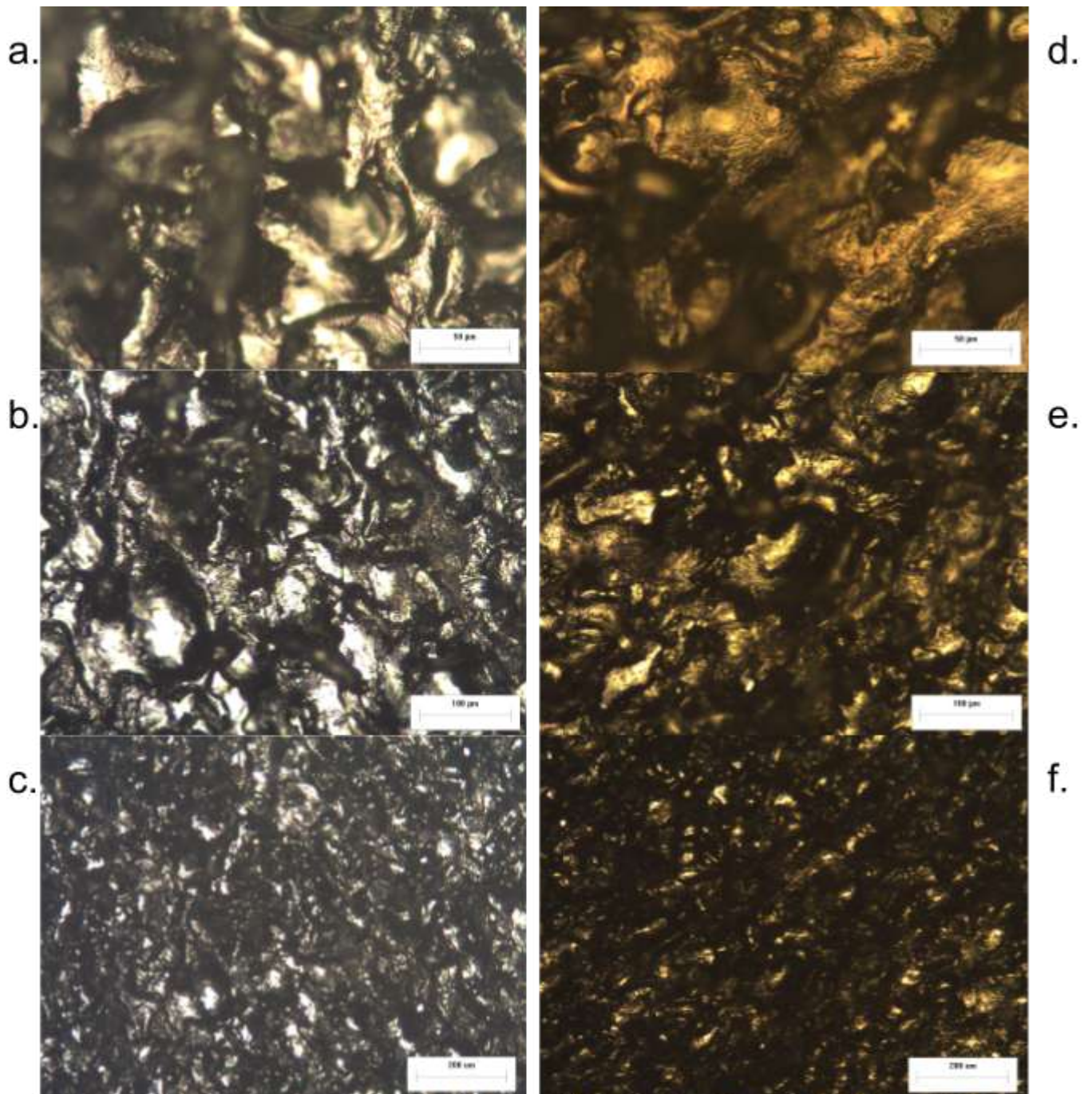


Figura 5.58. Superficie de probeta de acero inoxidable (18S) electroerosionada por hilo con nivel de potencia 102, imagen tomada en microscopio óptico: a. 20x, b. 10x, c. 5x y posteriormente electropulida: d. 20x, e. 10x, f. 5x.

Probeta I3:

La superficie antes y después del electropulido se observa en la Figura 5.59. El mecanizado previo fue EDM con nivel de potencia 5 y kerosene como dieléctrico. Se puede observar que el material redepositado mantiene la forma de esferas aunque resulta estar más atenuada. El proceso no fue capaz de borrar las fisuras presentes.

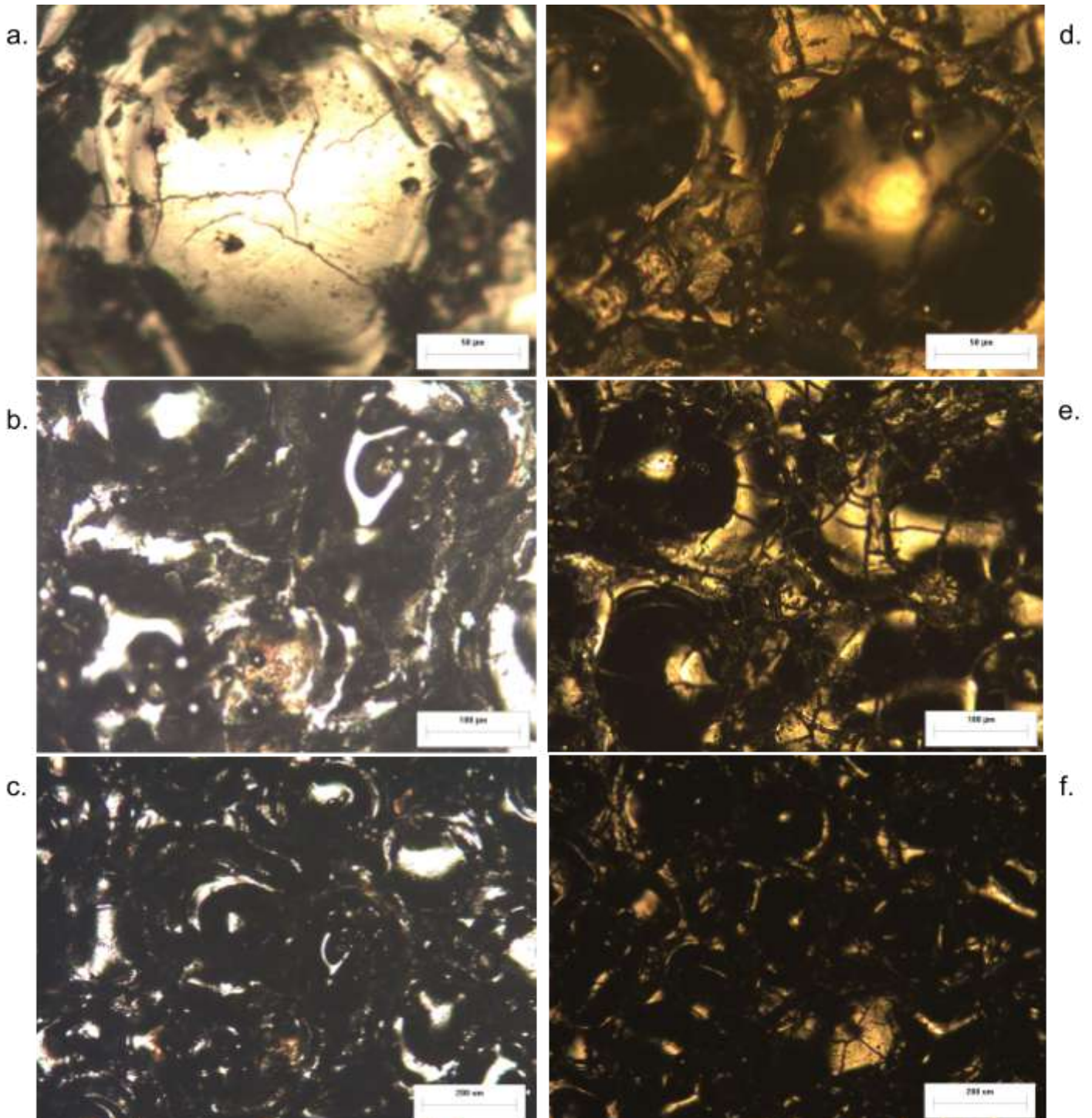


Figura 5.59. Superficie de probeta de acero inoxidable (I3) electroerosionada, imagen tomada en microscopio óptico: a. 20x, b. 10x, c. 5x y posteriormente electropulida: d. 20x, e. 10x, f. 5x.

5.2.3.2. Rugosidad superficial

En la Tabla 5.9, se presentan los valores de rugosidad medidos en las superficies electroerosionadas, previos al electropulido. Los valores de rugosidad de las probetas electropulidas se muestran en la Tabla 5.10.

Para las superficies electroerosionadas previamente con WEDM con diferentes potencias, probetas 12S (potencia mínima), 16S (potencia intermedia/alta) y 18S (potencia máxima), los valores promedio del parámetro Ra disminuyeron levemente. En el caso de la superficie I3 que fue generada por EDM a máxima potencia, Ra aumentó levemente. Sin embargo, las diferencias no resultaron significativas en ningún caso. Al comparar los parámetros Rt y Wt, tampoco se observan diferencias significativas antes y después del electropulido.

En conclusión, el proceso de electropulido no resultó efectivo para las superficies electroerosionadas de acero inoxidable con las condiciones de ensayo seleccionadas. Esto puede deberse a una característica intrínseca de la varilla utilizada como material de partida, ya que el electropulido efectuado sobre probetas obtenidas a partir de recortes de chapa en los ensayos de puesta a punto resultó efectivo.

Probeta	Ra [um]	Dispersión Ra [um]	Rt [um]	Dispersión Rt [um]	Wt [um]	Dispersión Wt [um]
12S	3,57	0,13	30,2	1,84	36,7	0,2
16S	3,87	0,47	24,3	1,9	23,5	3,3
18S	6,52	0,93	46,3	8,2	43,7	6,9
I3	4,60	0,79	26,7	43,6	43,6	4,2

Tabla 5.9. Valores de rugosidad medidos (cut-off 0.8) en probetas de acero inoxidable electroerosionadas.

Probeta	Ra [um]	Dispersión Ra [um]	Rt [um]	Dispersión Rt [um]	Wt [um]	Dispersión Wt [um]
12S	2,92	0,34	21,6	2,6	24,2	1,7
16S	3,66	0,68	25,6	5,2	32,3	2,7
18S	5,31	0,75	42,5	2,4	29,6	16,2
I3	4,88	0,90	29,7	3,1	41,4	17,1

Tabla 5.10. Valores de rugosidad medidos (cut-off 0.8) en probetas de acero inoxidable electropulidas.

5.5. Electropulido en probetas de aleación de titanio

5.5.1. Puesta a punto

Ensayo 1

Una vez seleccionado el electrolito, se procedió a realizar el primer ensayo con la varilla de Ti-6Al-4V. Las condiciones de ensayo se tomaron de la bibliografía consultada [Zhang et al, 2018].

$$\delta = 0,3 A/cm^2, A = 4,77 cm^2 \Rightarrow I = 1,43 A$$

Tiempo de ensayo = 4 minutos.

Temperatura ambiente, 30°C.

Durante el ensayo, se observa que la temperatura aumenta continuamente, llegando a 35,8°C. También, se pueden ver porciones de material que se desprenden de la superficie de la varilla, en forma de escamas. De acuerdo a una referencia bibliográfica previa, estas porciones de material corresponden a óxidos que se forman en la superficie durante el proceso de electropulido [Zhang et al, 2018].

Al extraer la varilla, finalizado el ensayo, se observan zonas brillantes y zonas opacas. Se deduce que en las zonas opacas pueden haber quedado los óxidos que no llegaron a desprenderse de la superficie.

Se optó por electropulir cuatro minutos más, con las mismas condiciones y, como resultado, la superficie se sobreatacó. Además, aparecieron zonas con tonalidad azul que pueden ser asociadas a la formación de óxidos de titanio.

Se repitió el ensayo para corroborar el resultado y al finalizar los primeros cuatro minutos de electropulido, la rugosidad Ra bajó. Además, se observó que la porción de la varilla que quedó opuesta al cátodo no se electropulió como la porción que quedó enfrentada al mismo.

Al finalizar el ensayo de 8 minutos, se observó una superficie sobreatacada, igual que la primera vez. Sin embargo, en este caso aparecieron zonas de color violeta. En conclusión, el mejor resultado se obtuvo en cuatro minutos de ensayo.

Las Figuras 5.60 y 5.61 corresponden a las imágenes tomadas de la superficie de la base de la varilla electropulida durante 4 minutos ininterrumpidos. Se observa una superficie pulida aunque con presencia de depósitos sobre la superficie.

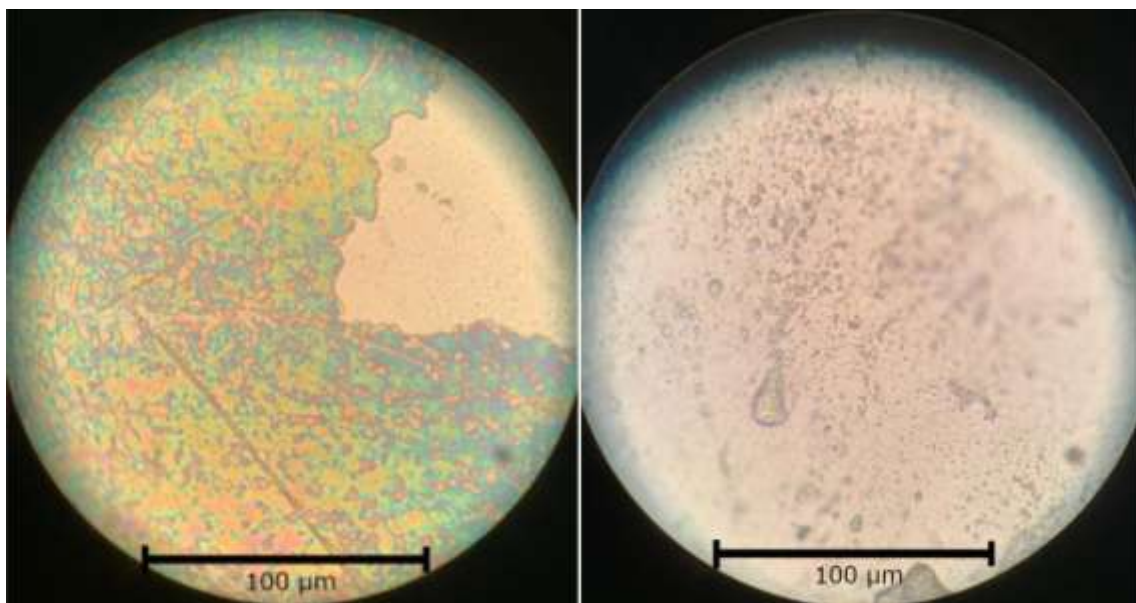


Figura 5.60. Imágenes de microscopio óptico con 50x de aumento de la superficie de la base de la varilla de aleación de titanio electropulida 4 minutos seguidos.

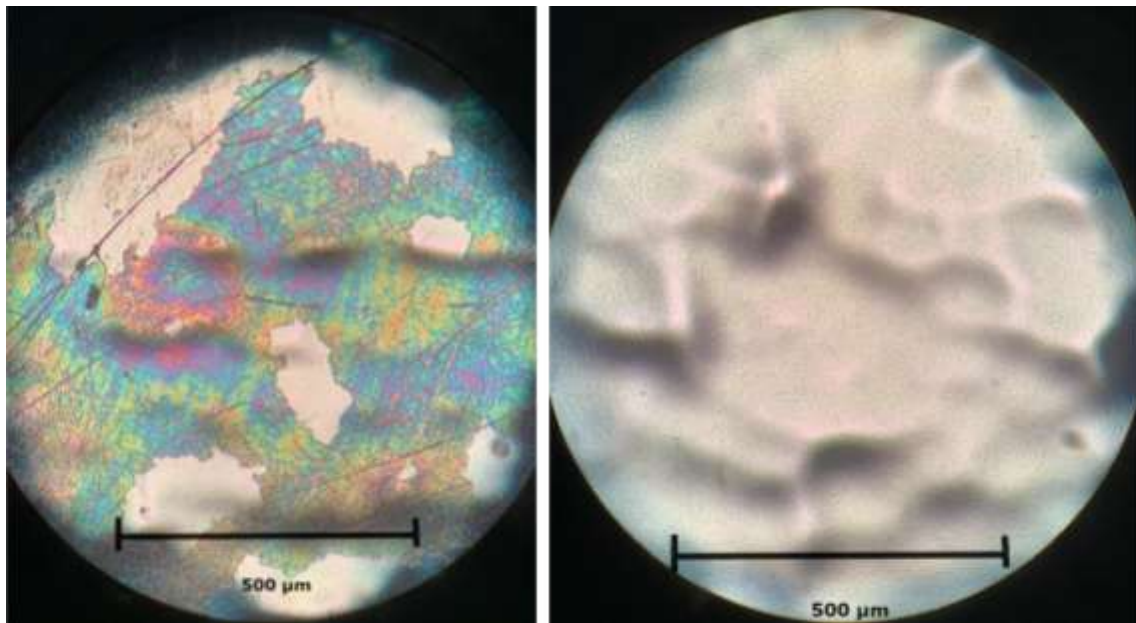


Figura 5.61. Imágenes de microscopio óptico con 10x de aumento de la superficie de la base de la varilla de aleación de titanio electropulida 4 minutos seguidos.

Ensayo 2

Se decidió realizar nuevamente el ensayo con una varilla de aleación de titanio durante cuatro minutos, interrumpiendo el ensayo cada un minuto. De esta forma, fue posible tomar rugosidad y verificar el tiempo óptimo de ensayo.

Luego del primer minuto, no hay cambios visibles en la superficie. Sin embargo, la rugosidad R_a aumentó.

Finalizado el segundo minuto, tampoco se observaron cambios en la superficie. Después del tercer minuto, aparecieron zonas electropulidas. Estas zonas se encontraban en la base de la varilla y los laterales próximos a la base.

Por último, luego de los cuatro minutos de ensayo, la mayor parte de la superficie electropulida se volvió opaca y las zonas brillantes adquirieron una tonalidad dorada.

Se tomaron imágenes de la superficie después de los cuatro minutos de ensayo interrumpidos (Figuras 5.62 y 5.63). Se observa un sobreataque en forma de esferas.

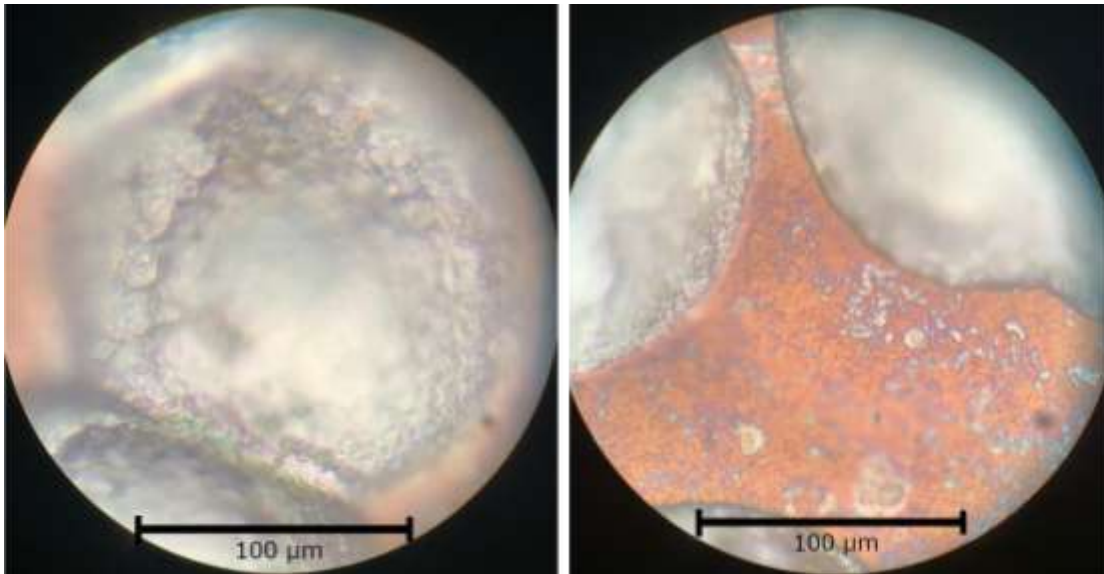


Figura 5.62. Imágenes de microscopio óptico con 50x de aumento de la superficie de la base de la varilla de aleación de titanio electropulida 4 minutos interrumpidos.

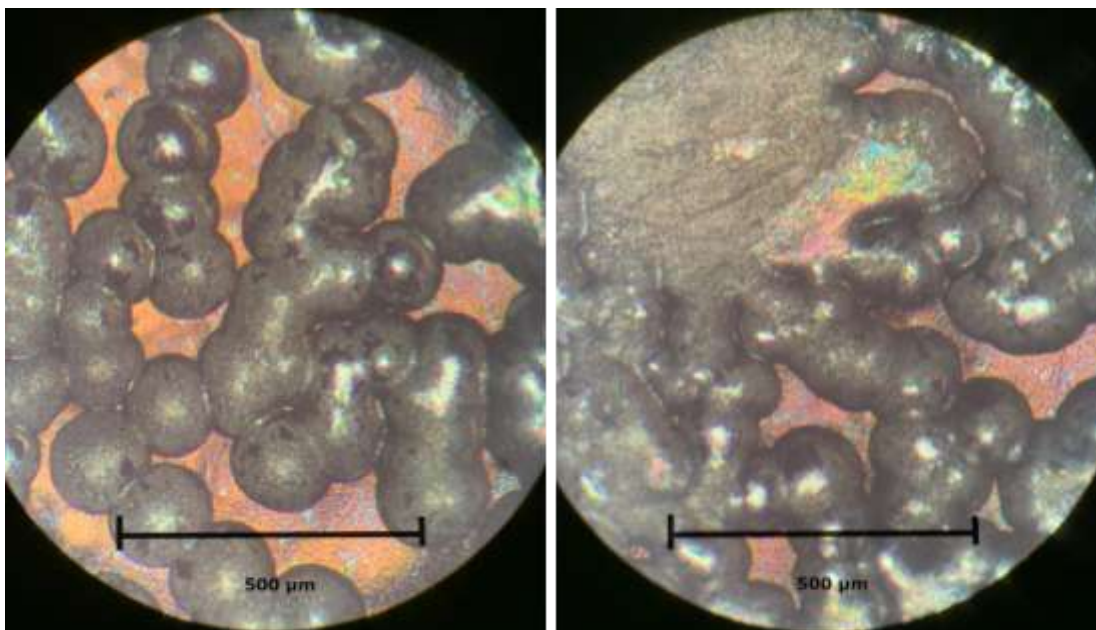


Figura 5.63. Imágenes de microscopio óptico con 10x de aumento de la superficie de la base de la varilla de aleación de titanio electropulida 4 minutos interrumpidos.

Ensayo 3

Se decidió probar el ensayo con las mismas condiciones del ensayo 1 durante 15 minutos seguidos. Durante el ensayo, fue muy complicado controlar la corriente ya que era inestable. Se tomó rugosidad de la base y Ra bajó pero la ondulación Wt aumentó considerablemente.

Se tomaron imágenes de la superficie con el microscopio óptico de laboratorio (Figura 5.64). Se observa una superficie completamente pulida, con baja ondulación visible.

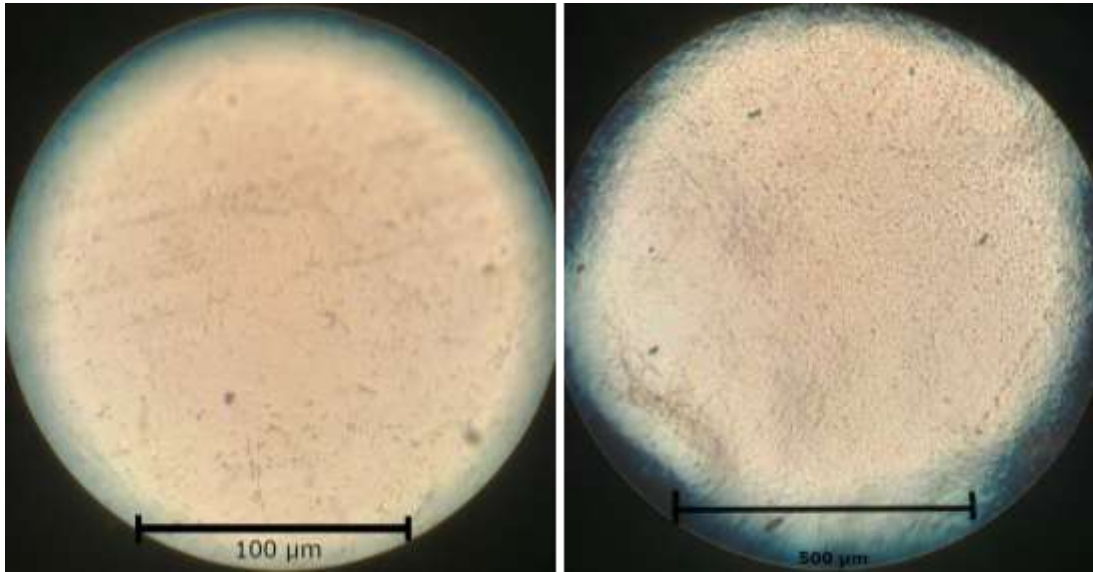


Figura 5.64. Imágenes de microscopio óptico con 50x (izquierda) y 10x (derecha) de la superficie de la base de la varilla de aleación de titanio electropulida 15 minutos seguidos.

Determinación de la curva tensión vs. densidad de corriente

Se realizó la curva de densidad de corriente en función de la tensión a temperatura de ensayo 30°C. Con los datos tomados, se relevó la curva mostrada en la Figura 5.65. Puede verse que a partir de una tensión aplicada de 14 V aproximadamente, el material presenta una disolución activa.

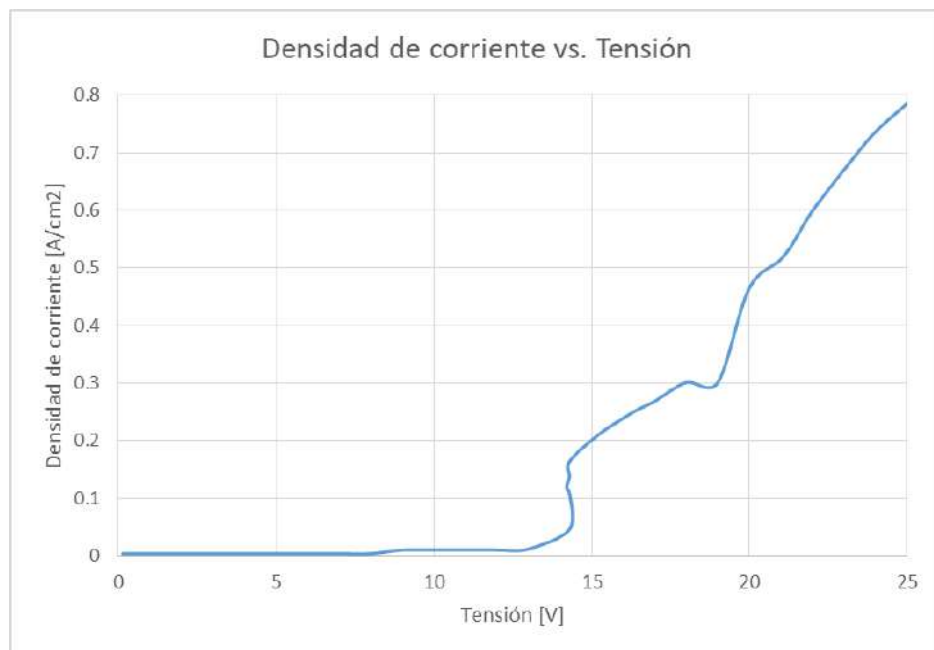


Figura 5.65. Densidad de corriente en función de la tensión, electropulido de varilla de aleación de titanio a 30°C.

5.5.2. Realización del ensayo

Teniendo en cuenta los resultados de los ensayos de puesta a punto, las condiciones del ensayo de electropulido son las siguientes:

$$\delta = 0,3 \text{ A/cm}^2, A = 0,196 \text{ cm}^2 \Rightarrow I = 0,059 \text{ A}$$

Tiempo de ensayo = 4 minutos.

Temperatura ambiente, 30°C.

Estas condiciones corresponden a las utilizadas en el Ensayo 1. En la Tabla 5.11, se muestran las probetas a electropulir con sus respectivos mecanizados previos.

Probeta	Mecanizado previo	Nivel de potencia	Dieléctrico	Electrodo
4S	WEDM	104	118	Mo
5I	WEDM	101	118	Mo
8I	WEDM	102	118	Mo
9I	WEDM	103	118	Mo

Tabla 5.11. Superficies a electropulir con el mecanizado previo y sus respectivas condiciones de ensayo.

Se seleccionaron tres probetas con rugosidad elevada. La probeta 4S se seleccionó para comparar y analizar el efecto de la rugosidad inicial en el proceso de electropulido.

5.5.3. Topografía superficial

5.3.3.1. Imágenes obtenidas en microscopio óptico

Se tomaron imágenes con un microscopio óptico de laboratorio de las superficies electropulidas de aleación de titanio. Se detallarán de nivel mínimo a nivel máximo de potencia aplicada en el proceso previo, WEDM.

Probeta 4S:

Las imágenes de la Figura 5.66 tomadas con microscopio óptico corresponden a la superficie antes y después del proceso de electropulido. Previamente, la superficie fue electroerosionada por hilo con un nivel de potencia bajo.

Luego del proceso de electropulido, el perfil fue significativamente modificado. A bajos aumentos (Figura 5.66.f), se puede observar una superficie aparentemente plana con depresiones de geometría esférica. Es interesante el cambio de color de la superficie. La superficie electroerosionada por hilo presentaba tonalidades doradas, azules y violetas. Luego del electropulido, la superficie es de color pardo y tonalidades de gris. Los grises más

oscuros se observan en las esferas de material mencionadas. A altos aumentos (Figura 5.66.d), se observan zonas completamente pulidas, con baja ondulación visible.

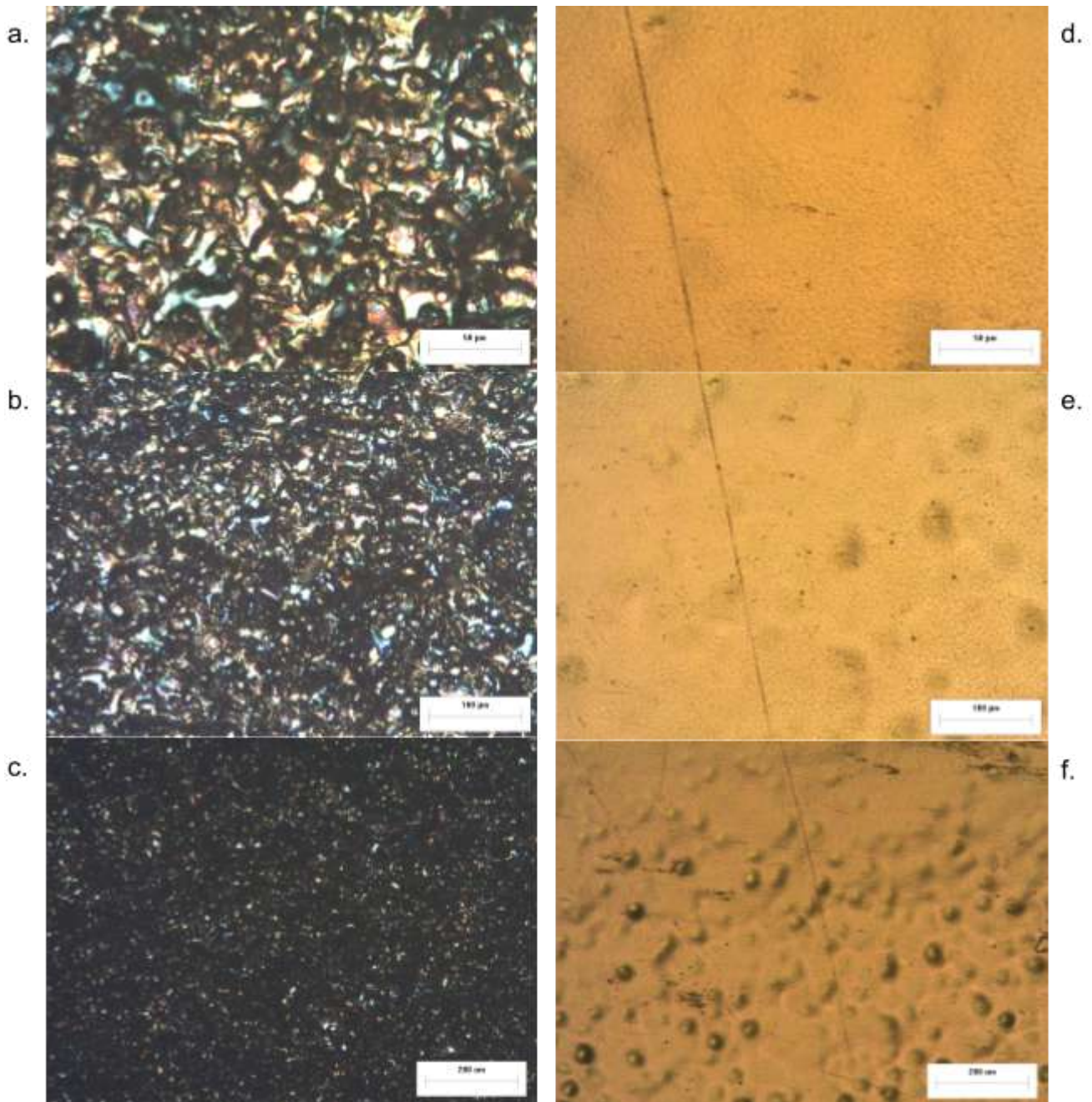


Figura 5.66. Superficie de probeta de aleación de titanio WEDM (4S), imagen tomada en microscopio óptico: a. 20x, b. 10x, c. 5x y posteriormente electropulida: d. 20x, e. 10x, f. 5x.

Probeta 9I:

En la Figura 5.67 se observan las imágenes tomadas con microscopio óptico de la superficie antes y después del proceso de electropulido. El mecanizado previo fue WEDM con potencia intermedia.

El proceso de acabado resultó muy eficiente ya que se obtuvo una superficie significativamente modificada con una gran atenuación de la textura. Como en la anterior probeta, hubo un cambio de color a dorado y negro. A bajos aumentos (Figura 5.67.f), se observa una gran ondulación. Se puede deducir que hubo una importante disminución de la rugosidad ya que, antes del proceso, no era posible enfocar la imagen en su totalidad y, luego, del electropulido si es posible.

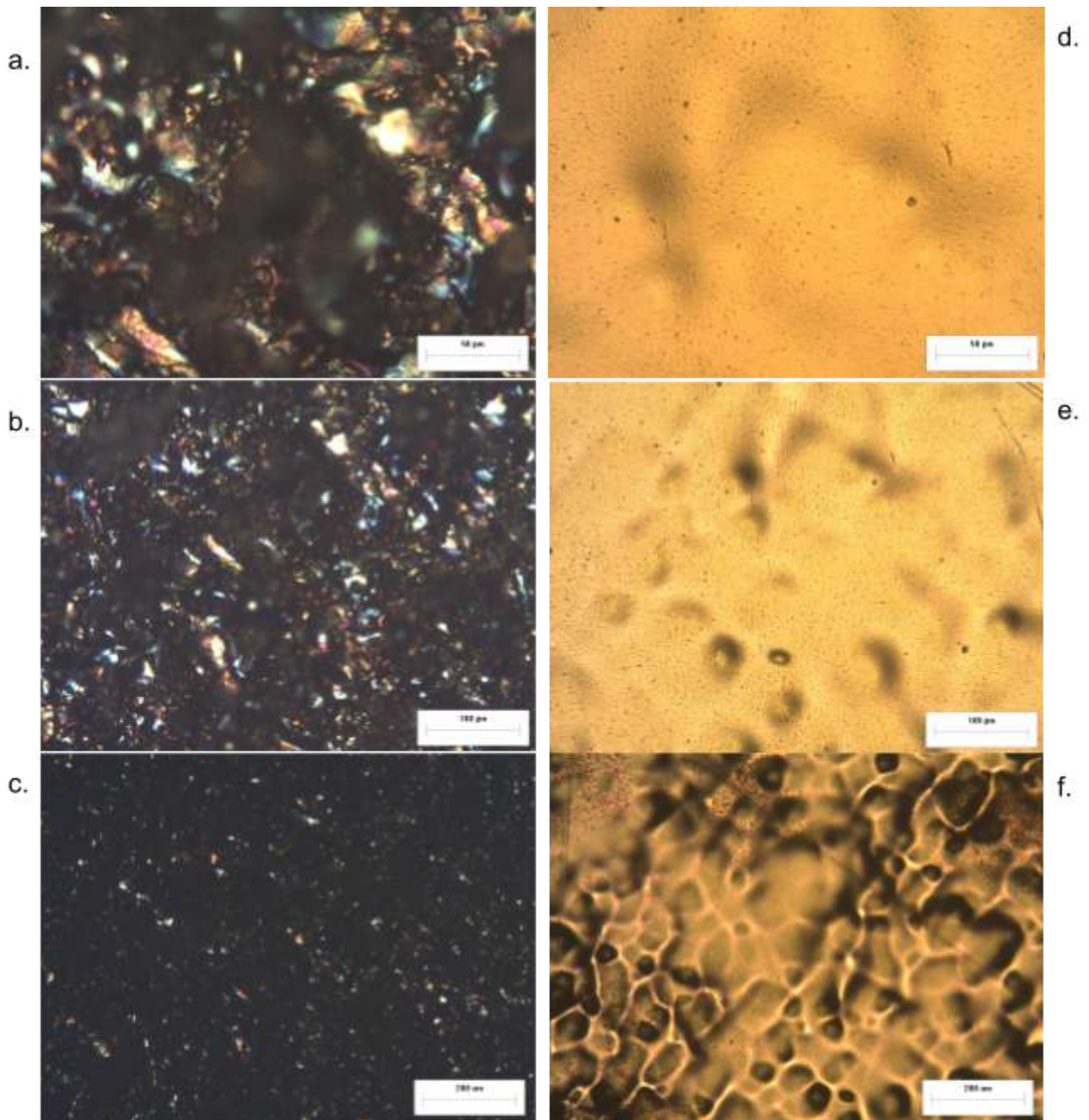


Figura 5.67. Superficie de probeta de aleación de titanio WEDM (9I), imagen tomada en microscopio óptico: a. 20x, b. 10x, c. 5x y posteriormente electropulida: d. 20x, e. 10x, f. 5x.

Probeta 5I:

La superficie 5I fue primero electroerosionada por hilo con nivel de potencia intermedio/alto y, luego, electropulida. La Figura 5.68 corresponde a las imágenes tomadas de ambas superficies en diferentes aumentos.

Es significativa la modificación superficial que ocurrió en la probeta luego del proceso de acabado. Como en la probeta 9I, hubo un cambio de color a dorado y negro. Se observa a bajos aumentos (Figura 5.68.f) zonas con topografía más irregular que otras. Se encuentran zonas más cercanas a una superficie pulida, aunque se puede apreciar una alta ondulación. A altos aumentos (Figura 5.68.d), es posible enfocar la totalidad de la superficie. En el microscopio, se observaron otras zonas con mayor irregularidad a las mostradas en las imágenes. En general, se puede concluir que el perfil fue significativamente atenuado.

En comparación con las superficies obtenidas de las probetas 4S y 9I, no fue posible obtener zonas tan pulidas. Esto se puede deber a que la probeta 5I partió de una superficie más rugosa por la mayor potencia aplicada en el proceso de WEDM.

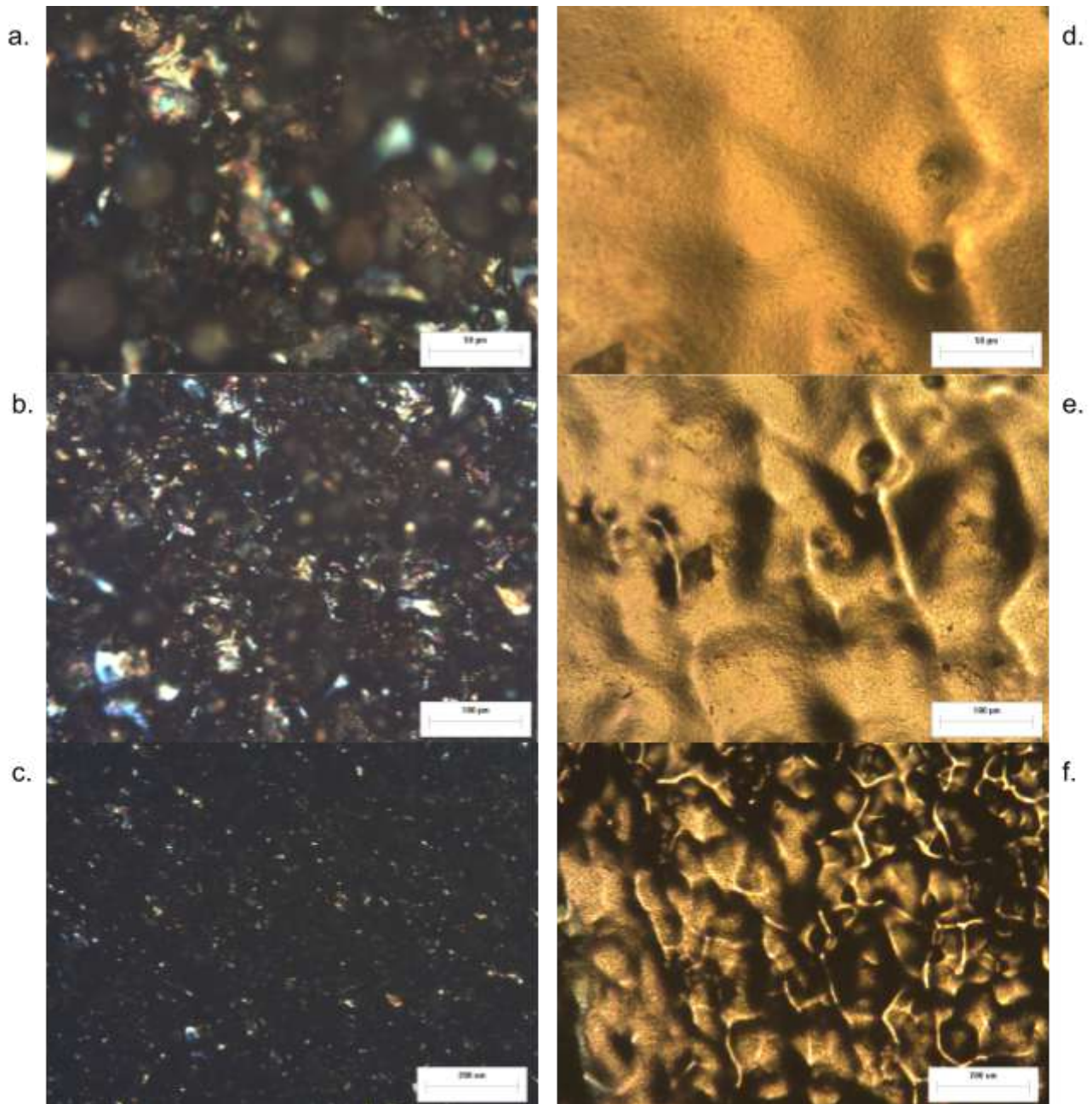


Figura 5.68. Superficie de probeta de aleación de titanio WEDM (5I), imagen tomada en microscopio óptico: a. 20x, b. 10x, c. 5x y posteriormente electropulida: d. 20x, e. 10x, f. 5x.

Probeta 8I:

La Figura 5.69 muestra imágenes tomadas con microscopio óptico antes y después del electropulido. Previamente, la superficie fue electroerosionada por hilo con un nivel de potencia 102.

Luego del electropulido, se observa una gran atenuación de la textura. Además, la superficie se tornó dorada y negra. Se encuentran zonas pulidas y zonas con geometrías más irregulares. A bajos aumentos (Figura 5.69.f), a pesar de encontrar zonas completamente

pulidas, se puede apreciar una gran ondulación. Es interesante que en las zonas irregulares, el electropulido no fue capaz de barrer la capa fisurada de la superficie (Figura 5.70.a).

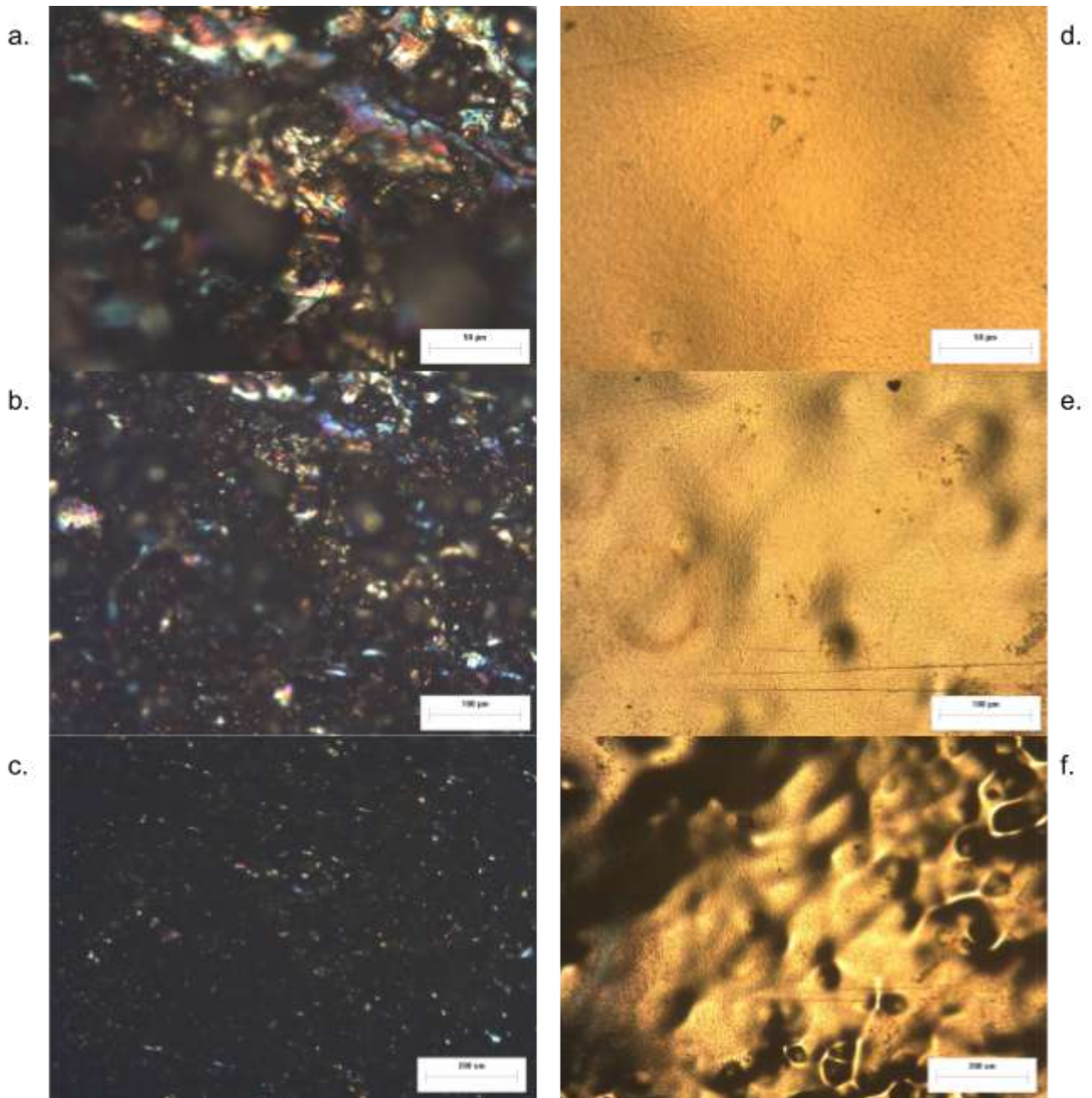


Figura 5.69. Superficie de probeta de aleación de titanio WEDM (81), imagen tomada en microscopio óptico: a. 20x, b. 10x, c. 5x y posteriormente electropulida: d. 20x, e. 10x, f. 5x.

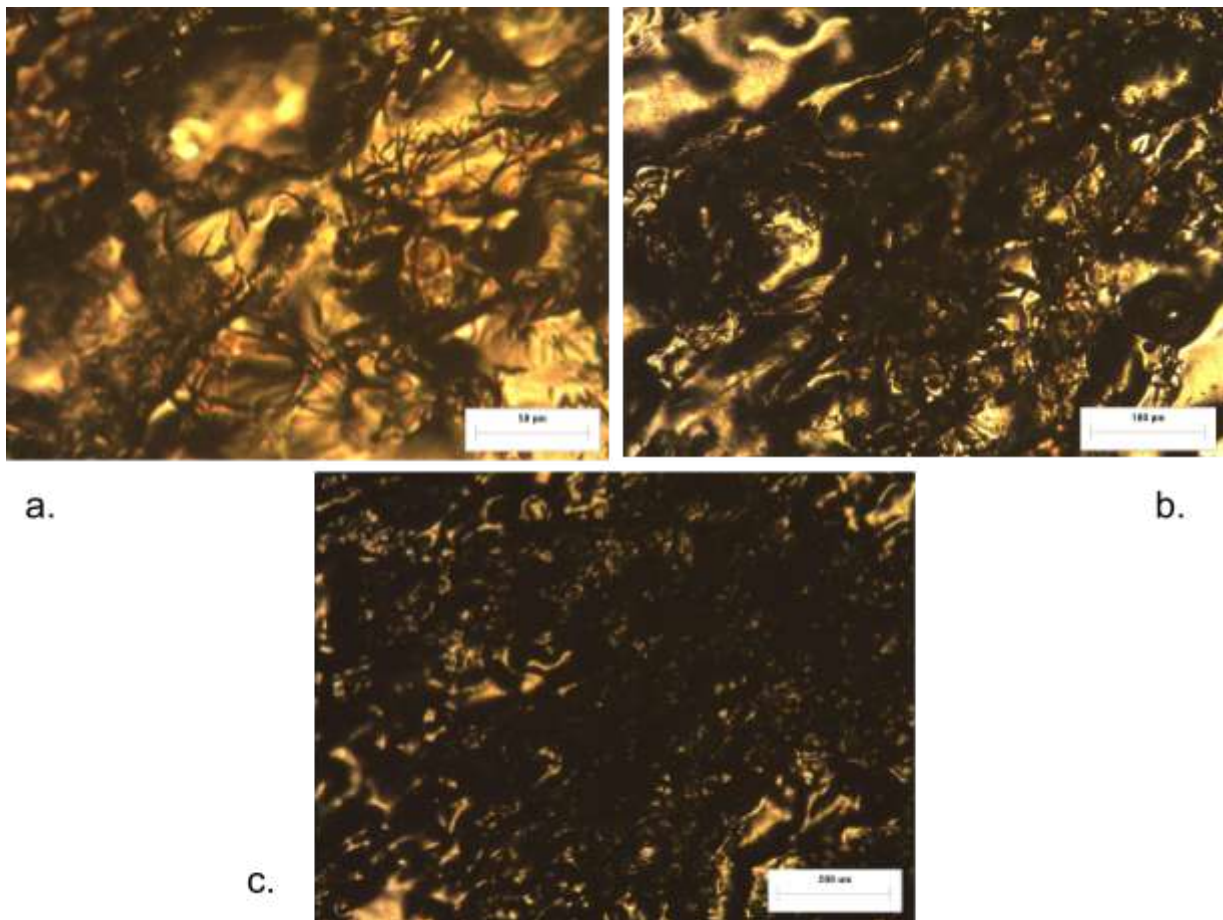


Figura 5.70. Superficie de probeta de aleación de titanio WEDM (8I) y electropulida, imagen tomada en microscopio óptico: a. 20x, b. 10x, c. 5x.

5.3.3.2. Rugosidad superficial

En la Tabla 5.12, se informan los valores de rugosidad de las superficies electroerosionadas por hilo. En la Tabla 5.13, se encuentran los valores de rugosidad de las probetas electropulidas de aleación de titanio. Cada valor se informa con la dispersión de los datos correspondiente.

En todas las superficies ensayadas, los parámetros de rugosidad R_a y R_t disminuyeron significativamente luego del electropulido. En todas las superficies, R_a disminuyó más del 50%.

Es interesante observar, que la rugosidad R_a obtenida luego del proceso de acabado es directamente proporcional a la potencia aplicada en el proceso previo de WEDM. Es decir, la probeta 4S obtuvo la menor rugosidad R_a y se electroerosionó con la potencia baja/intermedia. Y la mayor rugosidad R_a se obtuvo para la superficie que fue electroerosionada con máxima potencia (Probeta 8I).

En el caso del parámetro de ondulación W_t , se observa la misma tendencia de disminución en todas las superficies menos en la probeta 9I, en la cual triplicó su valor.

Probeta	Ra [μm]	Dispersión Ra [μm]	Rt [μm]	Dispersión Rt [μm]	Wt [μm]	Dispersión Wt [μm]
4S	2,33	0,47	17,9	2,8	43,4	7,1
5I	9,44	0,53	53,6	1,8	55,7	2,4
8I	9,13	0,23	54,6	3,7	38,6	8,5
9I	7,45	1,12	44,1	6,5	21,5	11,0

Tabla 5.12. Valores de rugosidad medidos (cut-off 0.8) en probetas de Ti-6Al-4V electroerosionadas por hilo.

Probeta	Ra [μm]	Dispersión Ra [μm]	Rt [μm]	Dispersión Rt [μm]	Wt [μm]	Dispersión Wt [μm]
4S	0,494	0,063	5,43	2,83	39,0	17,7
5I	3,427	0,570	22,53	4,51	38,3	19,7
8I	4,283	0,247	27,37	2,32	34,7	12,3
9I	1,157	0,231	8,34	1,58	73,5	28,1

Tabla 5.13. Valores de rugosidad medidos (cut-off 0.8) en probetas de Ti-6Al-4V electropulidas.

En conclusión, el proceso de electropulido luego de WEDM funcionó correctamente. Se obtuvieron superficies con perfiles atenuados y con una disminución de la rugosidad de hasta el 85% en un caso.

En la Figura 5.71, se muestran los perfiles de rugosidad medidos de la probeta 4S antes y después del proceso de electropulido. Previamente, la superficie fue WEDM a baja potencia. Se observa una gran disminución de la rugosidad luego del electropulido.

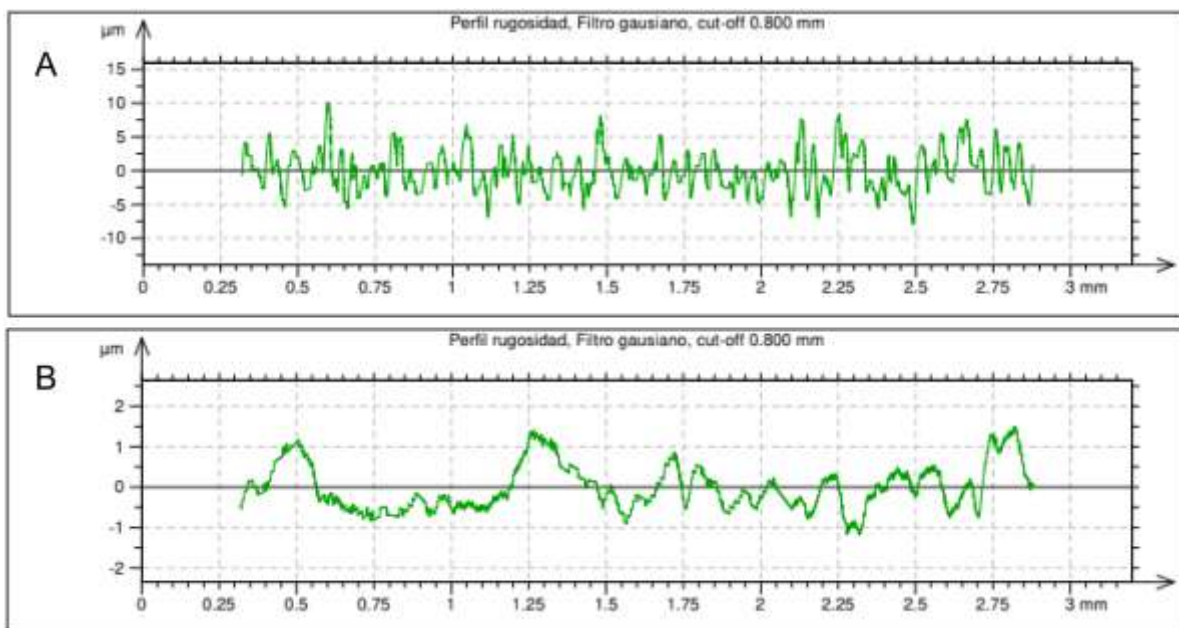


Figura 5.71. Perfil de rugosidad de probeta de aleación de titanio (4S): A. Superficie WEDM. B. Superficie electropulida.

5.6. Difracción de rayos X

En la Figura 5.72, se muestran los difractogramas desfasados en intensidad del acero inoxidable en bruto, electroerosionado con máxima potencia en kerosene (EDM) y, por último, electropulido. En el material bruto, se observan los picos de difracción principales de las fases austenita (γ) y martensita (α'), de acuerdo a las fichas ICDD 00-052-0513 y 00-044-1290, respectivamente. En la superficie electroerosionada, además de la presencia de austenita y martensita, se encontraron carburos de composición M_7C_3 , de acuerdo a la ficha ICDD 00-005-0720, donde M es una combinación de hierro (Fe) y cromo (Cr). Se observó también la presencia de carburos del tipo M_3C , en coincidencia con un trabajo reportado en la bibliografía previamente [Sidhom et al, 2012]. Luego del proceso de electropulido, la mayoría de los carburos fueron removidos de la superficie.

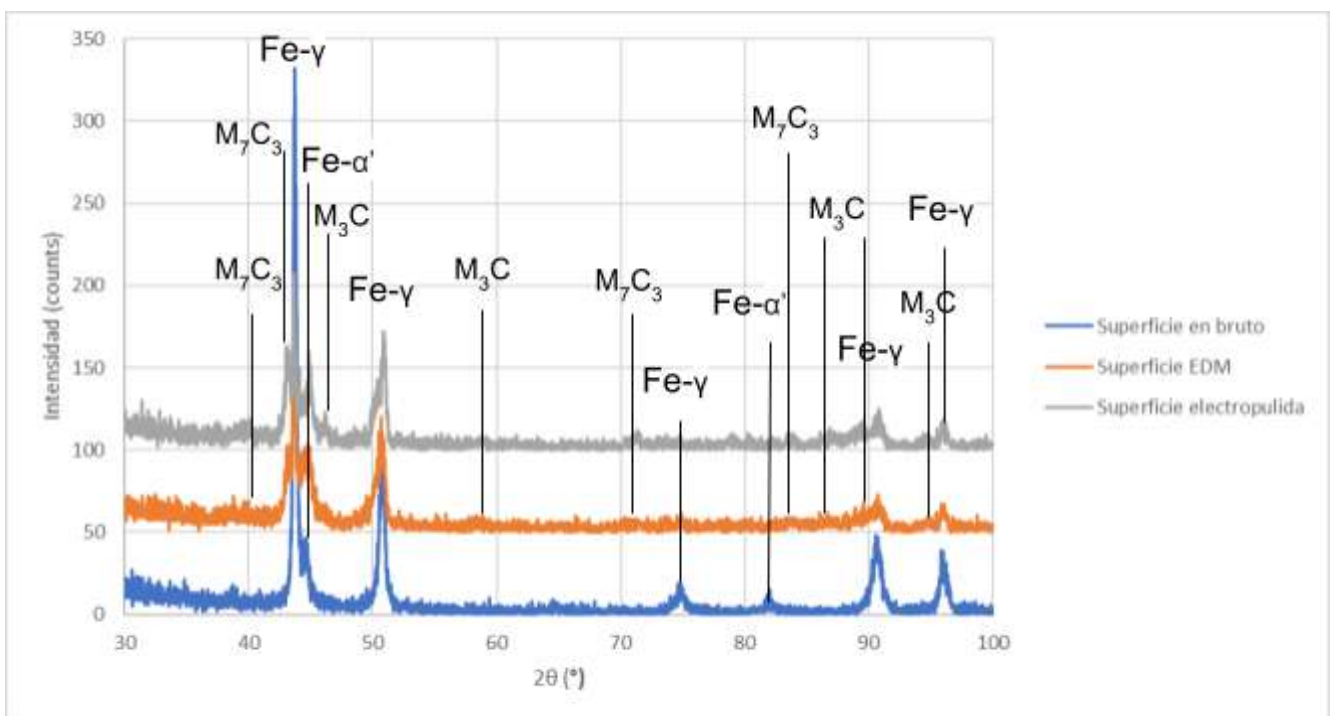


Figura 5.72. Diagrama de difracción sobre probeta de acero inoxidable en bruto, EDM con máxima potencia en kerosene (I3') y electropulida (I3).

En la Figura 5.73, se muestran los difractogramas desfasados en intensidad del acero inoxidable en bruto, electroerosionado con hilo con potencia máxima (WEDM) y, por último, electropulido. El material en bruto presenta las mismas fases mencionadas en el caso previo, fase austenítica en mayor cantidad y martensita en menor proporción. Luego del proceso de WEDM, no se observa la presencia de carburos ni de óxidos. El proceso de electropulido, por su parte, no realiza cambios en la superficie ya que nuevamente sólo se observan las fases γ y α' .

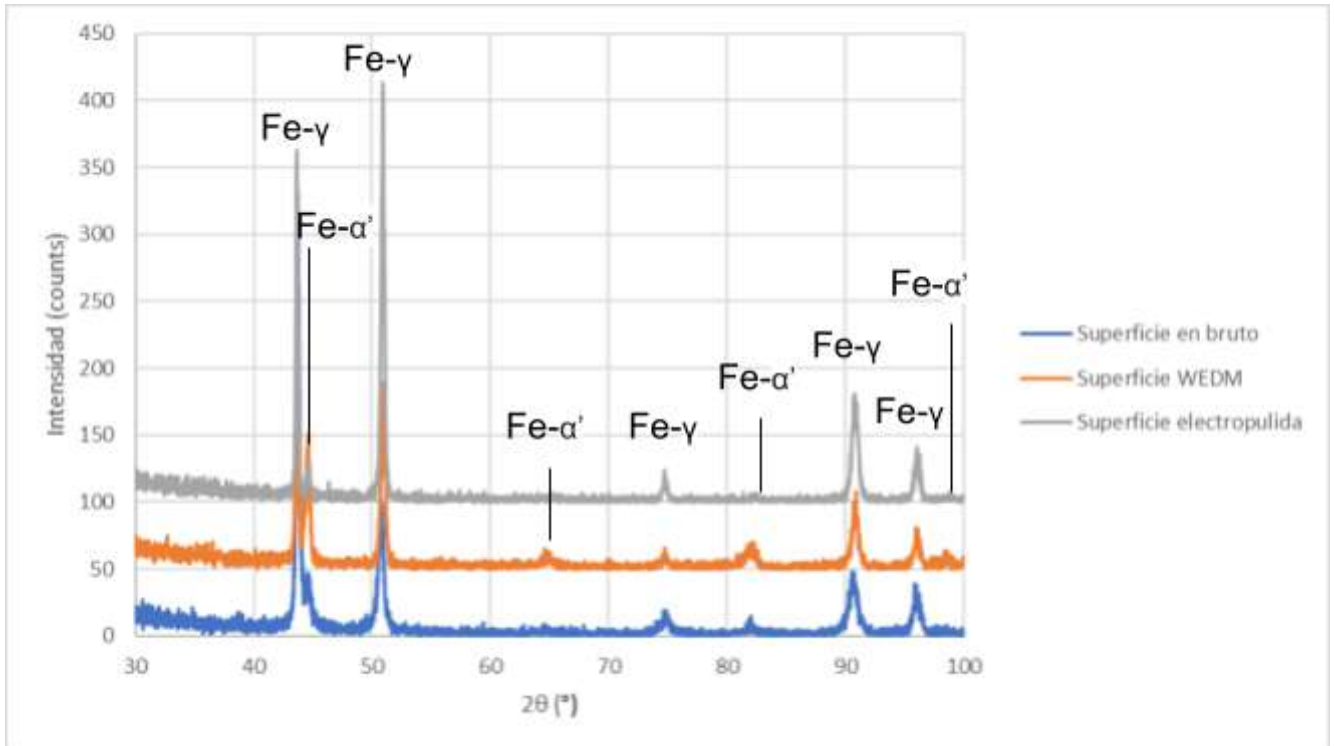


Figura 5.73. Diagrama de difracción sobre probeta de acero inoxidable en bruto, WEDM con potencia máxima (19S) y electropulida (18S).

En la Figura 5.74, se muestran los difractogramas desfasados en intensidad de la aleación de titanio en bruto, electroerosionada con hilo con potencia máxima (WEDM) y, por último, electropulida. El material en bruto presenta las fases $Ti\alpha$ y $Ti\beta$, de acuerdo a las fichas ICDD 00-005-0682 y 00-044-1288, respectivamente. Luego del proceso de WEDM, se formaron óxidos de titanio de composición TiO , de acuerdo a la ficha ICDD 00-008-0117, y Ti_NO , donde N puede ser 3 o 6, ya que ambos patrones de difracción son muy similares (fichas ICDD 01-073-1117 y 01-073-1118). No se observó la presencia de los óxidos del tipo Ti_2O_3 y Ti_3O_5 , considerados cuando se observaron en las imágenes tomadas con el microscopio. Por último, en la superficie electropulida sólo se observa la presencia de las fases $Ti\alpha$ y $Ti\beta$, lo que indica que los óxidos presentes antes del proceso fueron removidos con éxito.

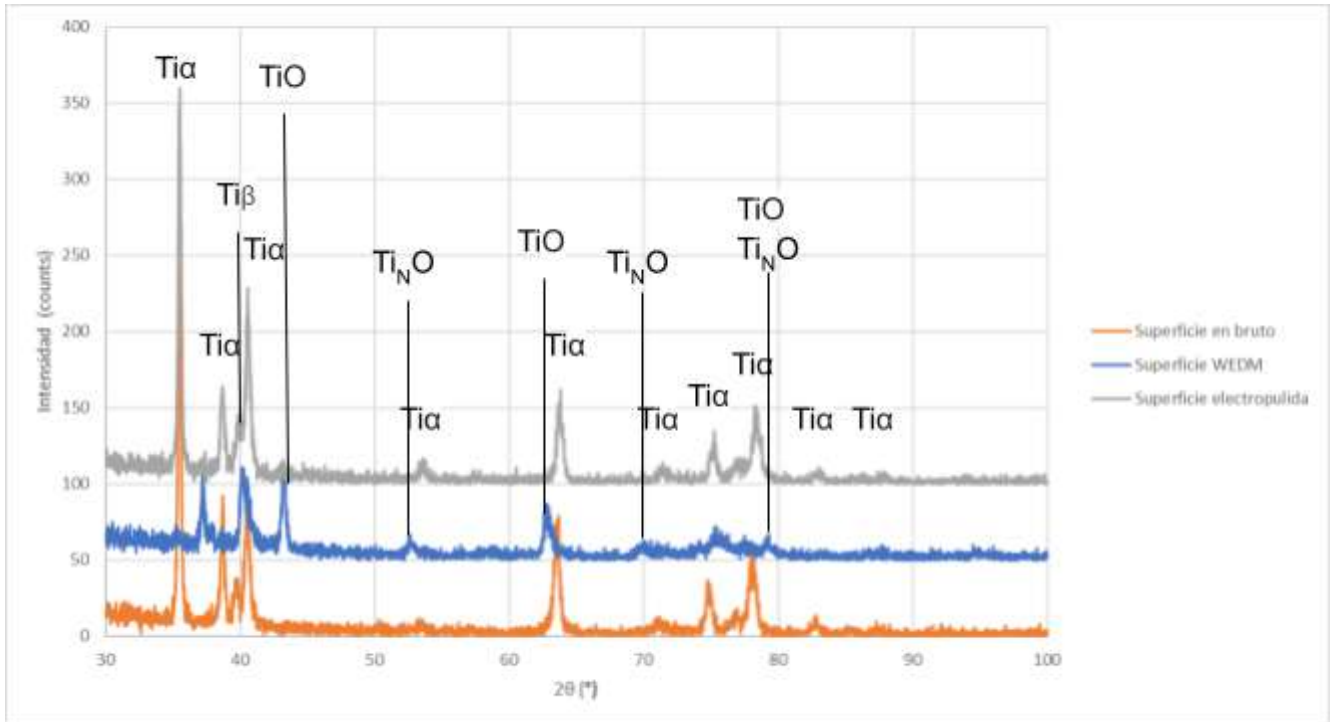


Figura 5.74. Diagrama de difracción sobre probeta de aleación de titanio en bruto, WEDM con potencia máxima (71) y electropulida (81).

6. Conclusiones

- Fue posible llevar a cabo la puesta a punto y realización de los ensayos de EDM, WEDM y electropulido en las aleaciones metálicas estudiadas. Se fabricaron los dispositivos necesarios para su correcta ejecución.
- Se obtuvieron las variables operativas más convenientes para la realización de operaciones de electropulido por EDM para probetas de acero inoxidable 316L y aleación de titanio Ti-6Al-4V.
- Para los ensayos de EDM en acero inoxidable, se verificó que la tasa de remoción es mayor cuando se utiliza kerosene como dieléctrico para un mismo nivel de potencia, sin embargo, la calidad de la superficie se ve disminuida. La utilización de kerosene introduce la variable de la contaminación de la superficie, por lo que, se concluye que es necesario realizar una segunda etapa de fabricación.
- En el caso de EDM en las probetas de aleación de titanio, se corroboró que la tasa de remoción es mayor con el uso del electrodo de cobre electrolítico. Además, se concluye que el proceso es más eficiente cuando se utiliza agua destilada como dieléctrico ya que aumenta la tasa de remoción mientras que no hay grandes diferencias en la rugosidad obtenida.
- En los ensayos de WEDM en titanio, el tamaño del material redepositado y la cantidad de fisuras son directamente proporcional a la potencia aplicada en el proceso. Además, al aumentar la potencia seleccionada, la tasa de remoción y el valor de la rugosidad Ra y Rt obtenidos aumentan.
- En las superficies de acero inoxidable generadas por WEDM no se encontró presencia de fisuras en las muestras. Además, el tamaño del material redepositado y la tasa de remoción son directamente proporcionales a la potencia seleccionada en el proceso.
- En general, el proceso de WEDM genera un patrón de franjas en la superficie por el movimiento del hilo. El ancho de las franjas es directamente proporcional a la tasa de remoción.
- Comparando los procesos de WEDM en ambos materiales, se concluye que en acero inoxidable tiene una mayor velocidad de corte, en las potencias intermedias y altas, en estas condiciones permite obtener una mejor terminación superficial. Sin embargo, se observa una tendencia decreciente en la tasa de remoción, hasta que en el nivel de potencia mínimo se revierte la tendencia, empleando menos tiempo de corte en el titanio.
- No resultó efectivo el proceso de electropulido para las superficies electroerosionadas de acero inoxidable con las condiciones de ensayo seleccionadas.
- El proceso de electropulido en la aleación de titanio luego de WEDM funcionó correctamente. Se obtuvieron superficies con perfiles atenuados y con una disminución de la rugosidad de hasta el 85%.

7. Trabajos futuros

Como resultado del desarrollo de este trabajo final se plantean las siguientes líneas de investigación para futuros desarrollos en el Área Tecnología:

- Analizar con mayor profundidad el efecto de los ciclos de electropulido en aleaciones de titanio para comprender por qué hay diferencia entre una superficie electropulida 4 minutos seguidos y otra electropulida 4 minutos interrumpidos cada 1 minuto.
- Analizar los efectos sobre la resistencia a la corrosión producida por las alteraciones superficiales generadas con los procesos de electroerosión y electropulido.
- Aplicar técnicas complejas de análisis de superficies para verificar la composición de los óxidos formados en las superficies electroerosionadas. Entre ellas se sugiere microscopía electrónica con EDX y EDS, así como FIB.
- Extender el estudio de estos procesos a otro material de creciente uso en la fabricación de máquinas envasadoras como es el acero para herramientas AISI D2.

8. Bibliografía

- Adachi, S., & Ueda, N. (2013). Surface hardness improvement of plasma-sprayed AISI 316L stainless steel coating by low-temperature plasma carburizing. *Advanced Powder Technology*, 24(5), 818-823.
- Aghdeab, S. H., & Ahmed, A. I. (2016). Effect of pulse on time and pulse off time on material removal rate and electrode wear ratio of stainless steel AISI 316L in EDM. *Engineering and Technology Journal*, 34(15 Part (A) Engineering).
- Camprubí Graell, A. (2007). *Electro-erosión: Fundamentos de su física y su técnica*. Marcombo.
- Carro, I. M. (2019). Ensayos de electropulido sobre distintos componentes de acero inoxidable AISI 316L.
- Cátedra de Metrología. (2016). *Metrología dimensional. Apunte de cátedra*. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Mar del Plata.
- Chen, S. L., Yan, B. H., & Huang, F. Y. (1999). Influence of kerosene and distilled water as dielectrics on the electric discharge machining characteristics of Ti-6Al-4V. *Journal of Materials Processing Technology*, 87(1-3), 107-111.
- Cotell, C. M., Sprague, J. A., Smith, Jr. F. A. *ASM Handbook Volume 5, Surface Engineering (10th Edition)*. Faith Reidenbach.
- Espriú Pérez, S. (2020). Empleo de solventes eutécticos profundos en el proceso de electropulido de piezas metálicas. Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Químicas.
- González González, C., Zeleny Vázquez, J.R., (1995). *Metrología, Capítulo 17*. Mc Graw Hill, México.
- Guilherme, A. S., Henriques, G. E. P., Zavanelli, R. A., & Mesquita, M. F. (2005). Surface roughness and fatigue performance of commercially pure titanium and Ti-6Al-4V alloy after different polishing protocols. *The Journal of prosthetic dentistry*, 93(4), 378-385.
- Hahn, T. S., & Marder, A. R. (1988). Effect of electropolishing variables on the current density-voltage relationship. *Metallography*, 21(4), 365-375.
- Haçalík, A., & Çaydaş, U. (2007). Electrical discharge machining of titanium alloy (Ti-6Al-4V). *Applied surface science*, 253(22), 9007-9016.
- Kim, D., Son, K., Sung, D., Kim, Y., & Chung, W. (2015). Effect of added ethanol in ethylene glycol-NaCl electrolyte on titanium electropolishing. *Corrosion science*, 98, 494-499.
- Kuriakose, S., & Shunmugam, M. S. (2004). Characteristics of wire-electro discharge machined Ti6Al4V surface. *Materials Letters*, 58(17-18), 2231-2237.
- Le Guéhennec, L., Soueidan, A., Layrolle, P., & Amouriq, Y. (2007). Surface treatments of titanium dental implants for rapid osseointegration. *Dental materials*, 23(7), 844-854.
- Lin, Y. C., Yan, B. H., & Chang, Y. S. (2000). Machining characteristics of titanium alloy (Ti-6Al-4V) using a combination process of EDM with USM. *Journal of Materials Processing Technology*, 104(3), 171-177.
- Machado, A. R., & Wallbank, J. (1990). Machining of titanium and its alloys—a review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 204(1), 53-60.

- Machining Data Handbook Vol. 2 (3rd Edition, 1980). Compiled by the Technical Staff of the Machinability Data Center.
- Martinesi, M., Bruni, S., Stio, M., Treves, C., Bacci, T., & Borgioli, F. (2007). Biocompatibility evaluation of surface-treated AISI 316L austenitic stainless steel in human cell cultures. *Journal of Biomedical Materials Research Part A: An Official Journal of The Society for Biomaterials, The Japanese Society for Biomaterials, and The Australian Society for Biomaterials and the Korean Society for Biomaterials*, 80(1), 131-145.
- Mendonça, G., Mendonça, D. B., Aragao, F. J., & Cooper, L. F. (2008). Advancing dental implant surface technology—from micron-to nanotopography. *Biomaterials*, 29(28), 3822-3835.
- Mitutoyo America Corporation. *Quick Guide to Surface Roughness Measurement*, USA; 2016.
- Ndaliman, M. B., Khan, A. A., & Ali, M. Y. (2011). Surface modification of titanium alloy through electrical discharge machining (EDM). *Int J Mech Mater Eng*, 6(3), 380-384.
- Olympus Corporation. *Introduction to Surface Roughness Measurement, Roughness measurement guidebook*, Japón, 2018.
- Palmieri, V. (2003). *Fundamentals of electrochemistry-the electrolytic polishing of metals: Application to copper and Niobium*.
- Pérez del Pino, Á. (2003). *Coloración del titanio mediante el tratamiento superficial de oxidación por láser*. Universitat de Barcelona.
- Piotrowski, O., Madore, C., & Landolt, D. (1998). Electropolishing of titanium & titanium alloys in perchlorate-free electrolytes. *Plating and surface finishing*, 85(5), 115-119.
- Prathipati, R., Dora, S. P., & Chanamala, R. (2020). Wear behavior of wire electric discharge machined surface of 316L stainless steel. *SN Applied Sciences*, 2(3), 1-8.
- Rotty, C., Mandroyan, A., Doche, M. L., & Hihn, J. Y. (2016). Electropolishing of CuZn brasses and 316L stainless steels: Influence of alloy composition or preparation process (ALM vs. standard method). *Surface and Coatings Technology*, 307, 125-135.
- Sidhom, H., Ghanem, F., Amadou, T., Gonzalez, G., & Braham, C. (2013). Effect of electro discharge machining (EDM) on the AISI316L SS white layer microstructure and corrosion resistance. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 65(1), 141-153.
- Struers. *Ensayo de dureza Knoop*. Sitio Web: <https://www.struers.com/es-ES/Knowledge/Hardness-testing/Knoop#knoophowto>
- Struers. *Metalografía del acero inoxidable*. Sitio Web: <https://www.struers.com/es-ES/Knowledge/Materials/Stainless-Steel#grinding>
- Tajima, K., Hironaka, M., Chen, K. K., Nagamatsu, Y., Kakigawa, H., & Kozono, Y. (2008). Electropolishing of CP titanium and its alloys in an alcoholic solution-based electrolyte. *Dental materials journal*, 27(2), 258-265.
- Tiwary, A.P., Pradhan, B.B. & Bhattacharyya, B. (2015). Study on the influence of micro-EDM process parameters during machining of Ti–6Al–4V superalloy. *Int J Adv Manuf Technol* 76, 151–160.
- Trabadelo, C., Montoya, L.P. (2018). *Ensayos de electroerosión (EDM) sobre una aleación de Titanio. Aplicación a la producción de implantes dentales*.

- Urlea, V., & Brailovski, V. (2017). Electropolishing and electropolishing-related allowances for powder bed selectively laser-melted Ti-6Al-4V alloy components. *Journal of Materials Processing Technology*, 242, 1-11.
- Verma, V., & Sajeevan, R. (2015). Multi process parameter optimization of diesinking EDM on titanium alloy (Ti6Al4V) using Taguchi approach. *Materials Today: Proceedings*, 2(4-5), 2581-2587.
- Wang, X., Liu, Z., Xue, R., Tian, Z., & Huang, Y. (2014). Research on the influence of dielectric characteristics on the EDM of titanium alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 72(5), 979-987.
- Yang, L., Wu, Y., Lassell, A., & Zhou, B. (2016). Electropolishing of Ti6Al4V parts fabricated by electron beam melting. In *2016 International Solid Freeform Fabrication Symposium*. University of Texas at Austin.
- Zhang, Y., Li, J., & Che, S. (2018). Electropolishing mechanism of Ti-6Al-4V alloy fabricated by selective laser melting. *International journal of Electrochemical Science*, 13(5), 4792-4807.