



FACULTAD *de* INGENIERIA
UNIVERSIDAD NACIONAL
de MAR DEL PLATA



Ensayos de electroerosión (EDM) sobre una aleación de Titanio. Aplicación a la producción de implantes dentales.

Camila Trabadelo (Mat. 8322)

Luis Pablo Montoya (Mat. 6707)

Tutores:

Ing. María Dolores Echeverría

Ing. Amadeo Daniel Sosa

Grupo Tecnología Mecánica

2018



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/).



Ensayos de electroerosión (EDM) sobre una aleación de Titanio. Aplicación a la producción de implantes dentales.

Resumen

Ante la necesidad de una mejor calidad superficial en los implantes dentales se aplican diversos tratamientos superficiales para su fabricación tales como el plasma spray, el arenado, el tratamiento ácido y el sinterizado de polvos esféricos. La calidad del implante se asocia con la capacidad que tenga este de integrarse al hueso, con la capacidad de adaptarse al entorno biológico sin perjudicarlo.

Para obtener una oseointegración satisfactoria, es necesario que la superficie del implante presente determinadas características de rugosidad, resistencia a la corrosión y dureza.

Estos requerimientos se alcanzan tanto gracias a los tratamientos mencionados como a la elección del titanio (en particular la aleación Ti-6Al-4V) como material de implante, ya que dentro de los materiales disponibles presenta las mejores características de biocompatibilidad y oseointegración. Sin embargo, dependiendo del método de fabricación aplicado se presentan ciertas problemáticas para la obtención simultánea de todas esas características.

Estudios preliminares sobre la aplicación del mecanizado por electroerosión sobre Titanio puro grado 2, han reportado la presencia de defectos, como fisuras o poros, que facilitan el crecimiento y desarrollo de colonias de bacterias provocando infecciones e intervenciones luego de realizado el implante. La formación de una capa superficial de óxido de Titanio de elevada dureza y con la rugosidad requerida a los implantes muestran a la electroerosión como un proceso con potencial para ser utilizado en la fabricación de los mismos. Debe decirse además que este proceso, hasta la actualidad, no tiene aplicación en la industria de implantes.

En base a lo anterior, en el presente proyecto se propuso la realización de ensayos de electroerosión sobre muestras de Ti-6Al-4V, variando condiciones de potencia y gap, para obtener superficies con la rugosidad requerida y mínimo tamaño de fisuras o poros. Los mismos se efectuaron con agua destilada como fluido dieléctrico y con electrodos del mismo material de las muestras. A su vez se diseñaron y construyeron los diversos elementos y accesorios necesarios para llevar a cabo los ensayos.

Con el fin de evaluar la calidad de las superficies obtenidas, se realizó análisis



metalográfico en las superficies de las muestras y los electrodos, empleando microscopio óptico y electrónico, así como estudios de difracción de rayos X y mediciones de dureza.

Mediante las distintas observaciones se pudieron relevar defectos superficiales tales como, fisuras, pitting y material redepositado. Al medir las rugosidades se pudo constatar que las mismas se encontraban dentro del rango aceptable para lograr la oseointegración. Además, la difracción de rayos X permitió identificar los compuestos superficiales presentes. Por último, las mediciones de dureza no presentaron cambios significativos entre la superficie tratada y el bulk del material que evidencien un cambio de composición.



Índice

1. IMPLANTES DENTALES	5
1.1. HISTORIA	5
1.2. GENERALIDADES.....	7
1.2.1. MATERIALES.....	10
1.2.2. POLÍMEROS	10
1.2.3. CERÁMICOS.....	10
1.2.4. METALES.....	11
1.2.4.1. ACERO 316L.....	11
1.2.4.2. ALEACIONES DE COBALTO	12
1.2.4.3. TITANIO	12
2. MAQUINADO POR ELECTROEROSIÓN (EDM)	17
2.1. GENERALIDADES.....	17
2.2. PRODUCCIÓN DE DESCARGAS.....	18
2.3. DIELECTRICO	19
2.4. CONDICIONES ÓPTIMAS DE ELECTROEROSIÓN GENERALES.....	21
2.5. CIRCUITO GENERADOR DE PULSOS.....	21
2.6. PARÁMETROS DEL PROCESO	23
2.7. TERMINOLOGÍA ELÉCTRICA	28
2.8. RUGOSIDAD	30
3. ELECTROEROSIÓN DE TITANIO	32
3.1. TOPOGRAFÍA SUPERFICIAL.....	33
3.2. TASA DE REMOCIÓN DE MATERIAL.....	33
3.3. RUGOSIDAD DE LA SUPERFICIE	34
3.4. METALURGIA DE LA SUPERFICIE.....	34
3.5. FORMACIÓN DE LÁMINAS	35
3.6. TENSIÓN SUPERFICIAL.....	35
4. OBJETIVOS	37
5. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	38
5.1. MATERIAL	38
5.2. PROBETAS Y ELECTRODOS	39
5.3. CONSTRUCCIÓN DE DISPOSITIVOS Y ACCESORIOS.....	40
5.4. TRATAMIENTO SUPERFICIAL POR EDM.....	45
5.5. CARACTERIZACIÓN SUPERFICIAL	47
5.5.1. TOPOGRAFÍA SUPERFICIAL	48
5.5.2. IDENTIFICACIÓN DE COMPUESTOS SUPERFICIALES	50
5.5.3. ANÁLISIS METALOGRAFICO	52
5.5.4. DETERMINACIÓN DE DUREZA	53
6. RESULTADOS.....	54
6.1. TIEMPOS DE ENSAYO OBTENIDOS.....	54



6.2. TOPOGRAFÍA SUPERFICIAL.....	56
6.2.1. IMÁGENES OBTENIDAS EN MICROSCOPIO ÓPTICO.....	56
6.2.2. IMÁGENES OBTENIDAS EN MICROSCOPIO ELECTRÓNICO	59
6.2.3. MEDICIONES DE RUGOSIDAD.....	63
6.3. IDENTIFICACIÓN DE COMPUESTOS SUPERFICIALES	70
6.4. ANÁLISIS METALOGRAFICO.....	74
6.5. MEDICIÓN DE DUREZA	77
7. CONCLUSIONES.....	77
8. TRABAJOS FUTUROS.....	78
9. BIBLIOGRAFÍA.....	80



1. Implantes dentales

1.1. Historia

La sustitución de dientes perdidos mediante sistemas de anclaje al hueso no es un concepto nuevo. Hallazgos arqueológicos han demostrado que culturas totalmente distantes, tanto en tiempo como en espacio, entre ellos los fenicios, etruscos, egipcios, romanos y pueblos de la América precolombina, practicaron el uso de prótesis dentales de diversas maneras y dejaron pruebas de este proceder, encontrándose vestigios de proto-odontología en el neolítico de hace 9.000 años, poniéndose al descubierto que el cuidado de la salud bucal fue una preocupación constante dentro de los pueblos primitivos [Coppa et al, 2006]. La primera evidencia arqueológica de oseointegración se dató en el siglo I o II d.C., al encontrarse en una calavera, procedente de un enterramiento Galo-Romano, un implante dental de hierro ajustado perfectamente al alveolo, el cual estaría colocado y funcional por lo menos durante un año, y de esta forma, sería viable que ocurriese la oseointegración del primitivo implante mediante el uso de tecnología básica [Crubzy et al, 1998].

En el Siglo X, el andaluz islámico Abulcasis, nacido en 936 en Córdoba, escribe: "En alguna ocasión, cuando uno o dos dientes se han caído, pueden reponerse otra vez en los alvéolos y unirlos de la manera indicada (con hilos de oro) y así se mantienen en su lugar. Esta operación debe ser realizada con gran delicadeza por manos habilidosas." [San Román F et al, 1990]. Ante las exigencias de los nobles y militares de rango, se pusieron de moda los trasplantes dentales, utilizando como donantes a los plebeyos, sirvientes y soldados. Posteriormente, estas prácticas fueron abandonadas ante la baja tasa de éxito y la posibilidad de transmisión de enfermedades. Se destaca por sus aportaciones en este campo el cirujano Ambroise Paré (1510-1590), quien publica, en 1572, en París, sus Cinq Livres de Chirurgie, en los cuales se tratan muchas y variadas cuestiones de cirugía bucal y odontología en general. Aconsejaba volver a colocar el diente en su alvéolo, si por equivocación había sido extraído. Duval, en 1633, podría considerarse como un innovador, ya que hizo muchas reimplantaciones, pero distinguiéndose de sus antecesores en que adoptaba la precaución de extirpar la pulpa y sustituirla por plomo u hojas de oro. [Portales médicos]

En 1809, Maggiolo fabricó un "implante" de oro, que se colocaba en el alveolo dental después de la extracción, al que acoplaba un diente tras un periodo de cicatrización. En 1887, un médico llamado Harris intentó el mismo procedimiento con una barra de platino, en lugar de oro. En 1886, Edmundo fue el primero en implantar un disco de



platino en la mandíbula, al cual se fijó una corona de porcelana. Después de estos pasos iniciales, se idearon otros sistemas de implantación siguiendo las mismas líneas, experimentando con diferentes aleaciones metálicas y formulaciones de porcelana, sin embargo, en general, el éxito a largo plazo era muy escaso.

Strock colocó los primeros implantes dentales con algo de éxito en 1937 en la Universidad de Harvard. Publicó un artículo basado en los efectos biológicos de la aleación cobalto-cromo-molibdeno, llamada vitalium, en el hueso, para lo que colocó implantes de este material en animales de experimentación, así como en personas. Estos implantes se insertaban inmediatamente tras la extracción de la pieza dentaria, sin que se registrasen complicaciones postoperatorias o reacciones adversas. Las secciones histológicas, obtenidas de animales, mostraban una remarcable tolerancia a los implantes de esta aleación. Algunos de los tipos de implantes usados hoy en día aun se basan en el vitalium.

Desde la mitad de los años treinta del pasado siglo hasta el presente, se desarrollaron ciertos conceptos de la implantología, que dieron lugar a la gran variedad de modelos de implantes dentales. El implante subperiosteal se usó con éxito durante treinta años, implantándolo por vez primera Gustav Dahl en 1948. El implante endoóseo en hoja, introducido independientemente en 1967 por Leonard Linkow, y Ralph y Harold Roberts, también demostraba ser una manera viable en la reconstrucción. El salto espectacular en implantología oral se logró en 1952 en el Laboratorio de Microscopía Vital de Lund, Suecia, por el equipo encabezado por Per Ingvar Brånemark, un cirujano ortopedista.

Uno de sus proyectos de investigación era estudiar en el hueso los eventos microscópicos de su cicatrización. El equipo del doctor Brånemark diseñó una cámara ósea alojada en un cilindro de titanio enroscado en el fémur de conejos. Después de varios meses, una vez que se completó el experimento, se dieron cuenta de que el titanio del cilindro se hallaba fusionado al hueso, siendo imposible sacarlo sin romper el hueso. Ellos denominaron a este fenómeno como oseointegración. Basándose en esta observación, orientaron su investigación más hacia el uso de sistemas de titanio en el hueso humano, incluyendo el uso de tornillos de titanio como anclajes óseos para dientes perdidos. Muchos experimentos y ensayos realizados por él mismo, y colegas de otras disciplinas e instituciones, se encaminaron en la dirección de aportar experiencia en física, química, biomecánica, medicina y fisiología. El concepto de oseointegración evolucionó conjuntamente con el diseño de un cilindro roscado de titanio con tratamientos de superficie específicos para aumentar su bio-aceptación.

Se desarrollaron muchos estudios en animales y, posteriormente, ensayos clínicos en personas para probar las tasas de éxito, el concepto, así como el diseño del implante. Brånemark luchó durante bastantes años contra las dudas y reticencias de la comunidad científica por medio de ensayos clínicos.



De hecho, no es hasta 1981 cuando su equipo dispone de los suficientes datos para publicar un artículo de referencia para una comunidad científica intrigada.

En 1982, la Conferencia de Toronto de Oseointegración en Odontología Clínica establece los primeros parámetros con los cuales se consideraba un tratamiento con implantes satisfactorio, dentro de los límites rigurosos de la comunidad científica. Esta conferencia dio lugar a la aceptación y uso de los implantes orales a nivel mundial [Dr. Manger].

1.2. Generalidades

Los implantes dentales son piezas de naturaleza mecánica que se colocan completamente en el hueso de la mandíbula (tanto superior como inferior) con el fin de reemplazar la raíz natural del diente y permitir la instalación de una prótesis dental.

A pesar de la influencia que tiene la forma del implante en la estabilidad al momento de colocarse y en la distribución de las cargas, no hay una estandarización en el diseño. En el mercado hay implantes dentales con diferentes formas, como se ilustra en la figura 1.1, y aunque basado en observaciones clínicas recientes la forma cónica presenta ventajas como mayor grado de compresión que los implantes cilíndricos, los más comúnmente usados son los cilíndricos roscados. Esto se debe a que los implantes cónicos no son aplicables bajo cualquier circunstancia.



Figura 1.1, diferentes formas encontradas en el mercado.



Otro factor clave a la hora de evaluar un implante es su biocompatibilidad, y esto es no solo la compatibilidad del material con el tejido en contacto sino también que sea capaz de cumplir una función específica. Por lo tanto, la biocompatibilidad no depende únicamente de las propiedades materiales (físicas, químicas, mecánicas), sino que también debe definirse la situación en que se utilizara el material [Williams, 2008].

El requisito de biocompatibilidad en un implante destinado a un contacto a largo plazo con los tejidos del cuerpo humano es que el material no dañe los tejidos, lo que supone una nula interacción química y biológica. Sin embargo, en el caso de implantes dentales, existe una necesidad de oseointegración, lo que implica la necesidad de interacciones específicas y directas entre biomateriales y componentes tisulares.

La oseointegración fue definida como el anclaje de un implante al hueso, capaz de satisfacer las exigencias clínicas de funcionamiento como pilar de prótesis, transmitiendo las fuerzas oclusales directamente sobre el tejido óseo, y manteniéndose fijo en el mismo, de forma asintomática, a lo largo del tiempo y en condiciones de carga funcional.

Esta oseointegración depende de 6 factores [Albrektsson et al, 1981] de los cuales tres están ligados a la condición particular del paciente y al control clínico: el estado del hueso receptor, la técnica quirúrgica y las condiciones de carga y los tres restantes dependen de las características del implante: material, diseño geométrico y características fisicoquímicas y topográficas de la superficie.

El estado del hueso receptor depende exclusivamente del paciente. Aunque existen varias técnicas quirúrgicas se sigue como regla general evitar un trauma excesivo de los tejidos para que el hueso sane y se adapte al implante lo antes posible. Las condiciones de carga deben ser controladas rigurosamente una vez realizado el implante; el proceso de cicatrización toma de 4 a 6 meses. Aplicar fuerza excesiva antes de que el tejido óseo-integre al implante en su totalidad puede destruir vínculos, generar residuos orgánicos y provocar una oseointegración defectuosa lo que significaría el fracaso de la operación haciendo necesaria una nueva intervención quirúrgica.

El material es uno de los principales factores a tener en cuenta a la hora de fabricar el implante. Esto se debe a la necesidad de asegurar la compatibilidad mecánica con el hueso (bajo módulo elástico, una alta resistencia a la rotura y una elevada resistencia a la fatiga) y la biocompatibilidad (evitar una reacción adversa en el huésped una vez instalado). [Figura 1.2]

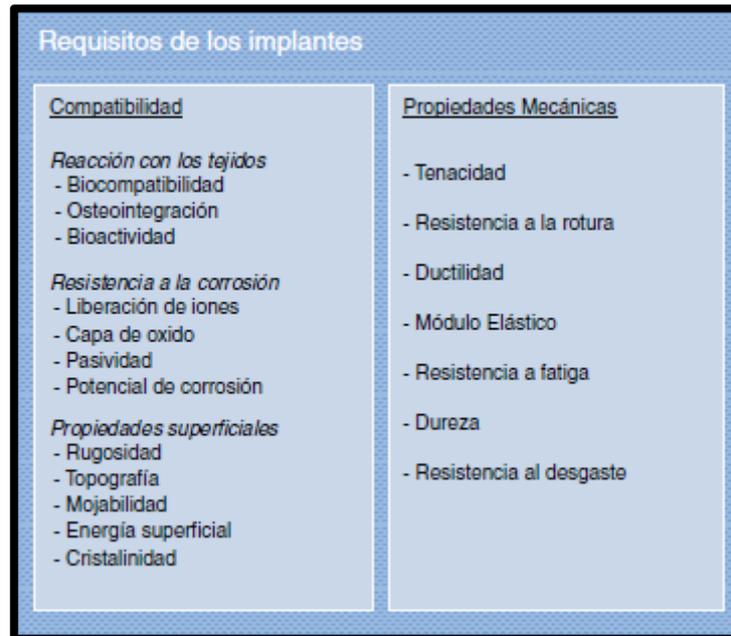


Figura 1.2, Requisitos de los implantes para aplicaciones ortopédicas.

Uno de los materiales más usados en la medicina de implantes por cumplir con estas características es el titanio, ya sea puro o aleado.

El diseño geométrico adecuado del implante y la elección del tipo de roscas permitirá una buena distribución de la carga y garantizar la estabilidad necesaria para favorecer una completa sanación del tejido.

Estudios realizados en los últimos años revelan que al controlar topografía superficial de los implantes se puede reducir el tiempo de cicatrización y asegurar que la interfase hueso-implante tendrá la suficiente resistencia mecánica para resistir las fuerzas en el ambiente oral [Schucker et al., 2006]. Modificar la rugosidad y área superficial pueden proporcionar un medio más adecuado para la adsorción de proteínas y el crecimiento celular, acelerando el proceso de regeneración del hueso y mejorando a corto y largo plazo la oseointegración de los implantes [Mendonça et al., 2008; Salou et al., 2015].

Por lo tanto puede concluirse que una vez obtenida la geometría de implante deseada será necesario realizar un tratamiento superficial sobre el mismo para lograr una oseointegración eficiente. Aunque no haya aún un valor de rugosidad estandarizado los valores aceptados oscilan dentro de un rango que va desde $0.1 \mu\text{m}$ a $7\mu\text{m}$.



1.3. Materiales

En la actualidad existe una amplia gama de materiales para la fabricación de implantes que incluye metales, cerámicos y polímeros.

1.3.1. Polímeros

Los materiales de origen polimérico presentan características de alta ductilidad, bajo peso y de fácil mecanizado. Sin embargo, debido a que presentan bajos módulos elásticos en comparación con el hueso, estos materiales se aplican principalmente en la sustitución de tejidos blandos como piel, cartílagos y ligamentos.

Uno de los primeros materiales poliméricos usado en medicina ha sido el polietileno de alto peso molecular. Este polímero es de tipo termoplástico y está formado por cadenas de muy elevada longitud y tiene un peso molecular que varía entre 2,106 y 6,106 g/mol. Las cadenas largas, ayudan a transferir la carga de forma más efectiva lo que resulta en un material muy tenaz con una resistencia mecánica al impacto mejor que la de cualquier material polimérico termoplástico sintetizado hasta el momento. El polietileno de alto peso molecular es muy resistente a los productos químicos corrosivos con la excepción de algunos ácidos, tiene un coeficiente de fricción muy bajo ya que se caracteriza por presentar auto lubricación y una elevada resistencia a la abrasión. [Ellis et al, 1974].

Debido a la alta resistencia mecánica que se requiere para implantes dentales, los materiales poliméricos no cumple con los requisitos mínimos para ser utilizado.

1.3.2. Cerámicos

Los biomateriales cerámicos se introdujeron en los años 70 cuando comenzaron a detectar fracasos en los biomateriales utilizados hasta ese momento, como eran el acero, aleaciones de cobalto y polimetilmetacrilato. Los biocerámicos más utilizados son la alúmina (Al_2O_3) y la zirconia (ZrO_2) y nitruro de silicio (Si_3N_4). Su principal aporte ha sido en la utilización de este material en implantes articulares debido a su baja tasa de desgaste lo cual ayudó a reducir drásticamente los problemas de osteólisis y aflojamiento aséptico, aumentando la vida media de los implantes y evitando así las complicaciones de una segunda o tercera intervención [Affatato et al, 2001]. Además presentan una alta resistencia a la compresión y una inercia química casi total.



El exponente más importante de esta familia de cerámicas está dado por la hidroxiapatita (HA), cuya fórmula química es $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, que es el componente fundamental de los huesos vivos, ya que el hueso natural es un material compuesto que contiene aproximadamente 80% de hidroxiapatita (que le proveen dureza) y 20% de fibras colágenas (que le proveen flexibilidad). Este material tiene pobres propiedades mecánicas y se lo emplea para aplicaciones que no deben soportar cargas, como por ejemplo, en recubrimientos de acero inoxidable, titanio o aleaciones de cobalto-cromo en implantes óseos y dentales y para reconstrucciones maxilofaciales.

Sin embargo a pesar de su buen comportamiento ante el desgaste el cerámico presenta problemas en términos de resistencia mecánica y tenacidad, ya que, al tratarse de materiales cerámicos monolíticos frágiles, poseen una fuerte predisposición a la rotura catastrófica [Diwanji et al, 2007].

El material cerámico, puede acumular daños como consecuencia del proceso de fabricación, mecanizado o acabado, esterilización (envejecimiento) o durante la intervención quirúrgica debido a un manejo incorrecto del implante [Bruce Burlington, D. 1997]. Incluso se pueden provocar defectos durante su uso debido a efectos de corrosión, degradación o impactos debidos a esfuerzos puntuales. Cualquier imperfección producida provoca la concentración de tensiones alrededor de ese defecto que inducirá la aparición de fisuras que pueden causar la rotura catastrófica del implante.

1.3.3. Metálicos

Debidos a sus buenas propiedades mecánicas (gran resistencia a la tracción, resistencia a la fatiga, ductilidad y tenacidad en comparación con los materiales cerámicos y poliméricos) los materiales metálicos son los más ampliamente utilizados para la fabricación de implantes. Su principal desventaja radica en la aparición de productos no deseados en el organismo debido a la corrosión que pueden sufrir. Por esto mismo los metales que se utilicen deben poseer también una elevada resistencia a la corrosión. Los metales más conocidos y usados como implantes son: el acero 316L, aleaciones de cobalto, el titanio puro y la aleación Ti-6Al-4V.

1.3.3.1. Acero 316L

El acero 316L es un acero inoxidable austenítico, su resistencia a la corrosión es mayor que en los aceros ferríticos y martensíticos. Poseen un contenido de cromo mayor al 16%, que lo vuelve inoxidable. A pesar de esto, el cromo estabiliza la fase ferrítica, fase



cúbica de cuerpo centrado, que es más débil que la fase austenítica cúbica de caras centradas. Para limitar esta tendencia se agrega un contenido de níquel mayor al 14% que estabiliza la fase austenítica y asegura la tenacidad de la microestructura. Además se añade molibdeno a la aleación que forma una capa protectora que aísla el metal pese a la exposición a un ambiente ácido. La desventaja de esta aleación es la susceptibilidad que presentan de corroerse por tensiones o en grietas.

1.3.3.2. Aleaciones de cobalto

La más utilizada para odontología es la aleación CoCrMo (F76), la cual es obtenida por colada. Posee una excelente resistencia a la corrosión. Pero su principal inconveniente es su módulo de elasticidad, el cual es superior al del hueso (220 GPa). Al ser más rígido que el hueso el implante termina cargado con mayores esfuerzos (relajación de tensiones) lo que conlleva a una pérdida de masa ósea por reabsorción [Aparicio Bádenas, Conrado, 2005].

1.3.3.3. Titanio

El titanio es uno de los materiales más utilizados a la hora de fabricar implantes ya que cumple los requerimientos (resistencia a la corrosión, biocompatibilidad, adhesión, módulo de elasticidad cercano al del hueso, resistencia a la fatiga y facilidad de fabricación) mejor que otros materiales. Además no produce reacciones inmunológicas o alérgicas [Gerd Lütjering et al, 2005].

El titanio puro al 99,75% o bajo forma de aleación (Ti-6AL-4V), tiene la capacidad de aislarse del ambiente biológico mediante un estrato de óxido (capa pasivadora), preferiblemente óxido de titanio TiO₂, el cual normalmente alcanza un espesor de 200 nanómetros. Además de resistir los ataques químicos, la capa de óxidos, actúa como barrera evitando la cesión de cualquier tipo de ion desde el metal hacia el medio fisiológico. La penetración del tejido óseo en el implante no ocurre en espacios inferiores a 100 μm [Guercio et al, 2008].

El titanio metálico puro presenta una excelente resistencia a la corrosión, ya que soporta el ataque de los ácidos inorgánicos, de la mayoría de orgánicos y del cloro húmedo. Sin embargo, reacciona muy rápidamente con el oxígeno, el nitrógeno, el hidrógeno y el carbono.

Es el noveno elemento más abundante en la corteza de la Tierra, el cual se extrae como



rutilo (TiO_2) e ilmenita ($\text{FeO}\cdot\text{TiO}_2$). Sólo un 10% de la producción total se destina a la obtención de titanio en forma metálica. El 90% se destina a la fabricación de dióxido de titanio, el cual es usado en forma de pintura protectora antióxido. Del 10% restante, el 50% es utilizado para la fabricación de la aleación Ti6Al4V.

El titanio es el único metal ligero que presenta dimorfismo, ya que en estado puro su estructura compacta hexagonal (fase α) presenta una transformación alotrópica a 882°C , pasando a una microestructura cúbica centrada en el cuerpo (fase β). En equilibrio, la estructura β es inestable a temperaturas menores a 882°C , descomponiéndose de nuevo en la fase α al enfriar el titanio por debajo de la temperatura de transición. Esta transformación ofrece la posibilidad de obtener aleaciones con microestructuras de tipo α , β ó α/β , dependiendo de los elementos aleantes que estabilizan una u otra fase. La aleación Ti6Al4V se clasifica dentro del último grupo. En el caso de esta aleación, el aluminio presente estabiliza la fase α y el vanadio estabiliza la fase β .

El Ti6Al4V puede adquirir gran variedad de microestructuras, según el tratamiento termomecánico empleado. La microestructura se puede clasificar en varias categorías, destacando la equiaxial, la martensítica, la laminar y la bimodal (mezcla de equiaxial y laminar).

Al enfriar lentamente desde temperaturas donde todo el material está en fase β , se genera una estructura laminar de placas a de Widmanstätten, con una mayor tenacidad a fractura y mayor resistencia a la corrosión inducida por tensión y a la fluencia, y una menor velocidad de propagación de grieta.

Las aleaciones α/β permiten obtener una estructura martensítica α' al ser enfriadas rápidamente desde temperaturas superiores a la temperatura de β -transus, o bien $\alpha'+\alpha$ si se enfría desde $900^\circ\text{--}1.000^\circ\text{C}$. Estas estructuras sirven como punto de partida a diferentes tratamientos térmicos.

Microestructura equiaxial

Las estructuras equiaxiales se obtienen tras trabajar mecánicamente el material en el rango de temperaturas $\alpha+\beta$. Un recocido posterior a temperaturas menores a la temperatura de inicio de martensita (por ejemplo 700°C) produce una microestructura formada por granos finos de α y β , denominada mill-annealed [Figura 1.3], si bien esta estructura depende mucho del trabajado previo del material. Durante el proceso de recocido, la microestructura consta de fase α primaria y de fase β . Al enfriar el material, la fase α primaria no transforma, por lo que mantiene su morfología original, pero la fase β sí que se transforma, con la estructura final dependiente de la velocidad de



enfriamiento desde la temperatura de recocido.

Si la temperatura de recocido es más alta, la fase β se transforma a fase α secundaria con estructura laminar, y se obtiene una estructura formada por granos α y regiones laminares finas, denominadas con el término 'b-transformada', si bien el término se refiere a paquetes laminares de α secundaria. La estructura así obtenida se denomina microestructura dúplex [Figura 1.4].

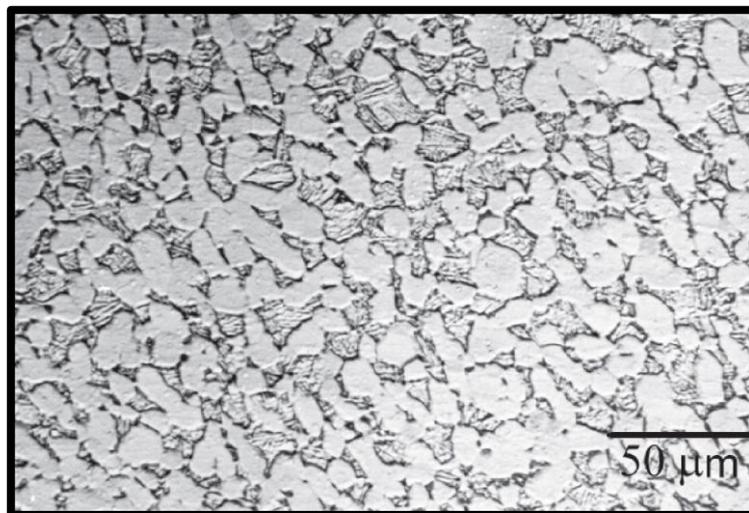


Figura 1.3, Microestructura *mill-annealed* del Ti6Al4V.

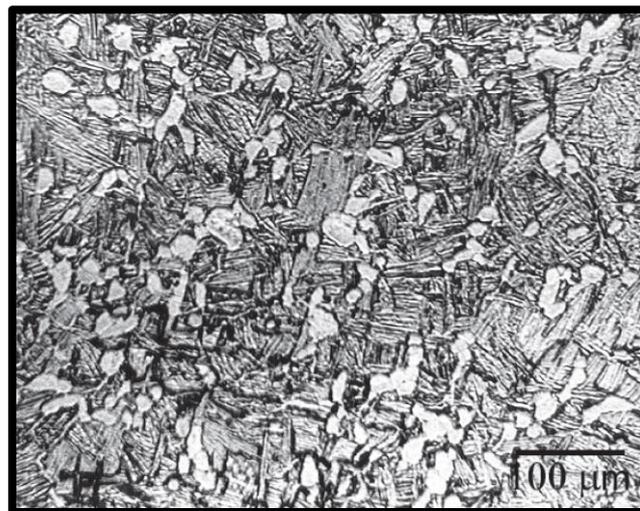


Figura 1.4, Microestructura dúplex del Ti6Al4V.

Microestructura martensítica

La estructura martensítica se obtiene por enfriamiento rápido o temple desde temperaturas superiores a β -transus, lo que genera la estructura de transformación masiva martensita o fase α' . Esta microestructura, mostrada en la Figura 1.5, es acicular o finamente laminar y tiene parámetros de red similares a los de la fase α .

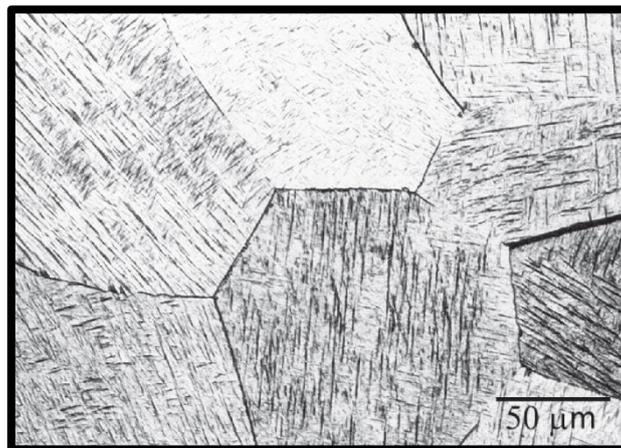


Figura 1.5, Microestructura martensítica del Ti6Al4V.

Microestructura laminar o de Widmanstätten

Las estructuras laminares o de Widmanstätten se obtienen por enfriamiento lento desde temperaturas superiores a β -transus hasta la región bifásica. La ralentización del proceso de enfriamiento permite una difusión controlada entre las fases α y β cuando la temperatura disminuye por debajo de β -transus y la fase α comienza a nuclearse en los bordes de grano β , produciéndose un crecimiento de la fase α en forma de láminas. Como se observa en la Figura 1.6, la estructura laminar resultante se compone de gruesas placas de fase α y finas placas de fase β , unidas formando paquetes o colonias. Esta estructura es llamada fase α laminar, estructura de Widmanstätten o bien tipo cesta.

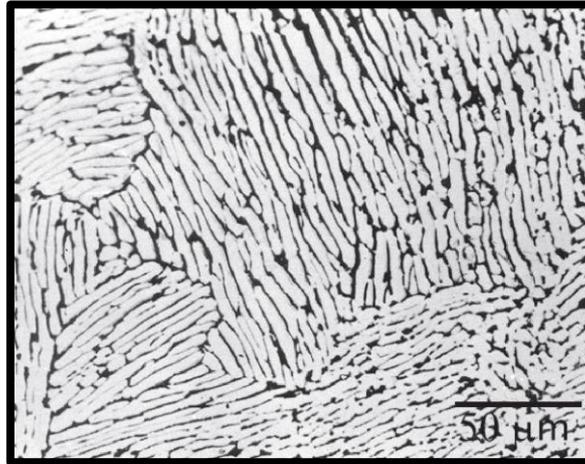


Figura 1.6, Microestructura Widmanstätten del Ti6Al4V.

Microestructura bimodal

Las microestructuras bimodales consisten en granos α aislados en una matriz β transformada. Se obtienen con un recocido a 950°C , seguido de un temple en agua, y un envejecimiento a 600°C . Se consigue entonces un grano α de $15\text{--}20\ \mu\text{m}$ de diámetro aislado por fase β retransformada. Sin embargo, si se envejece a 650°C se produce la descomposición de precipitados de la fase β en granos de fase α .

Relacionando las microestructuras con las propiedades mecánicas que pueden obtenerse, se puede decir que los límites de las colonias y la martensita son fuertes obstáculos para la propagación de grietas. En consecuencia se observa una mejora en la resistencia a la fatiga de bajos ciclos con el aumento de las velocidades de enfriamiento (disminución del tamaño de colonia).

De acuerdo a Lutjering el parámetro microestructural más importante que determina las propiedades mecánicas, para las aleaciones de titanio $\alpha + \beta$, es el tamaño de colonia α . Con la disminución de la colonia α (disminución de la longitud de deslizamiento), el límite elástico, la ductilidad, la resistencia a la propagación de grietas (junto con la resistencia a la nucleación de grietas) se mejoran, mientras que solo la resistencia a la propagación de macro fisuras y la tenacidad a la fractura se mejora con un gran tamaño de colonia α . Los últimos efectos son probablemente debido al aumento de la rugosidad de la fisura y al fenómeno de cierre de grietas. El tamaño de la colonia de α depende de la velocidad de enfriamiento del campo de fase β y del tamaño de grano β , que limita las dimensiones máximas de la colonia α .



Otro parámetro importante que afecta las propiedades mecánicas de esta aleación es el efecto de los elementos de aleación. La fase β contiene menor concentración de esos elementos (especialmente oxígeno) que promueven el endurecimiento por envejecimiento por la formación de partículas de Ti_3Al coherentes. La ductilidad, el comportamiento de propagación de micro y macro grietas y la resistencia a la fractura, está determinado principalmente por el tamaño de colonia α . La dependencia del límite elástico en la fracción de volumen α , está determinada tanto por el efecto de tamaño de colonia α como por el elemento de aleación. [G. Lütjering (1998)]

Las aleaciones alfa poseen mayor resistencia mecánica y alta resistencia a la oxidación a temperaturas elevadas (588-811 K), además poseen muy buena soldabilidad comparada con los otros grados de titanio. Sin embargo, no responden bien a tratamiento térmico y tienen la resistencia mecánica más baja a la temperatura ambiente.

Generalmente, el titanio en fase beta es más dúctil que la fase alfa debido al mayor número de planos de deslizamiento en la estructura bcc de la fase beta en comparación con la fase alfa hcp. Esto hace que la fase beta posea alta maquinabilidad.

2. Maquinado por electroerosión

2.1. Generalidades

La electroerosión es un procedimiento no convencional que se basa en la reproducción automática de la forma de un electrodo empleando una corriente eléctrica. Se requieren de corrientes pulsantes unidireccionales de elevada energía. Las mismas producen chispas hacia el material eléctricamente conductor a través del fluido dieléctrico.

Una de las ventajas de este tipo de maquinado es que puede mecanizar cualquier tipo de metal sin importar su dureza o tenacidad.

La eliminación de material se produce gracias a una serie de descargas eléctricas pulsantes separadas en el tiempo. Entre dos descargas consecutivas hay un lapso de tiempo de inactividad, llamado tiempo de pausa.

Si el arco eléctrico saltase a través del aire, sería incontrolable, es por esto que se utiliza un fluido dieléctrico, para que la descarga sea precisa y controlable. Este comprime la descarga impidiendo que se ramifique, concentrándose así sobre un punto de la pieza. Respecto de otros maquinados en la electroerosión no aparecen grandes esfuerzos, esto se debe principalmente a que entre electrodo y pieza existe un pequeño espacio,

denominado GAP, no habiendo contacto directo entre ambos.

Cada una de las descargas produce un cráter sobre la superficie de la pieza por la fusión y vaporización de pequeñas cantidades de material. La sucesiva acción de gran cantidad de descargas genera sobre la pieza una forma complementaria a la forma de la herramienta y una superficie caracterizada por una sucesión de cráteres. La rugosidad superficial típicamente está en el rango de 1,6 a 3,2 micrones. La superficie residual superficial es poco profunda (0,025 mm) pero puede tener un alto grado de resistencia a la tracción. La resistencia a la fatiga de las superficies de EDM sin post-tratamiento usualmente se reduce severamente.

2.2. Producción de descargas

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.

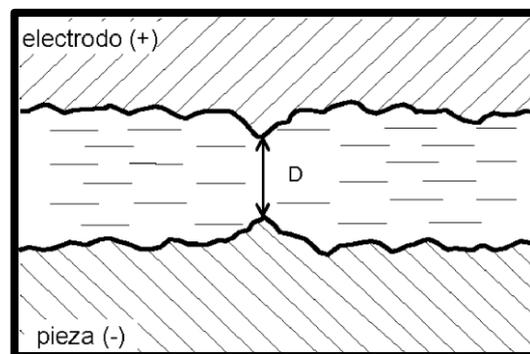


Figura 2.1, Lugar de máxima proximidad entre electrodo y pieza.

En un momento dado, se superará la tensión de ruptura 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. La misma 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.

El punto superficial al que llega la descarga es calentado por el flujo de electricidad hasta que el material es vaporizado. Cuando deja de circular corriente el fluido se desioniza y parte del material fundido se solidifica y es arrastrado por el flujo de fluido.

Las sucesivas descargas producirán una erosión en ambas superficies. Durante la misma se produce un importante efecto térmico y electrodinámico, además tiene lugar una acción mecánica, donde se suceden dilataciones y contracciones. 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.

Esta disimetría en la erosión depende de la conductividad térmica, el calor específico, el punto de fusión del material, del fluido dieléctrico, de la forma de los impulsos y de la polaridad de los electrodos.

Respecto de la polaridad, se utiliza la polaridad directa 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 electrodo-pieza, utilizando polaridad inversa.

2.3. Dieléctrico

Además de controlar la descarga, el dieléctrico cumple otras funciones. Entre ellas actúa de aislante entre el electrodo y la pieza, para que al alcanzar la tensión de ruptura se produzca la circulación de corriente eléctrica solo por un pequeño canal.

Otra función importante es la de generar una burbuja de alta presión alrededor del canal de corriente [Figura 2.2]. Al cesar el paso de corriente la burbuja implota gracias al dieléctrico, creando una onda de choque que hace que el material fundido sea proyectado hacia el exterior, dejando cráteres en las superficies. Dependiendo de la presión interna de la burbuja y de la viscosidad del dieléctrico, la misma implota de una forma más o menos lenta, eliminando completamente o no, el material fundido. De no eliminarse queda resolidificado sobre la superficie de la pieza.

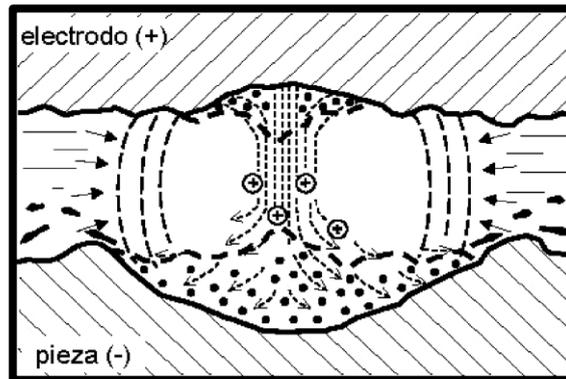


Figura 2.2, Burbuja alrededor del canal.

Propiedades deseadas del dieléctrico:

- Baja viscosidad.
- Alta resistencia dieléctrica.
- Alto punto de flash.
- Libre de ácidos, alcalinos y productos de corrosión (particularmente compuestos de azufre cuando se mecanizan aceros sin azufre)
- Baja toxicidad (particularmente compuestos de cloro)

Dieléctricos utilizados en EDM:

- Aceites de hidrocarburo: Es el más utilizado.
- Agua destilada: Usada principalmente para micro maquinado y máquinas de corte por electroerosión.
- Kerosene: Bueno para súper acabado pero poco usado. Requiere prestar especial atención a precauciones de seguridad.
- Aceites de silicona: infrecuentemente usadas debido a su costo.
- Soluciones de etilenglicol: raramente usadas.
- Gas: aplicaciones muy especializadas.

Si el dieléctrico logra barrer el material desprendido se obtiene poco desgaste en el electrodo y buena capacidad de arranque de material. Si al contrario no se dan buenas condiciones de limpieza el desgaste aumentará y disminuirá el arranque de material, dándose por lo tanto un mal rendimiento de la operación.

El dieléctrico debe eliminar:

- Los gases provenientes de la disociación del dieléctrico.
- Las partículas provenientes de la erosión, arrancadas tanto del electrodo como de la pieza [Figura 2.3].

De no eliminarse completamente el gas no se podrán formar bien las descargas, perdiéndose rendimiento.

Respecto de las partículas arrancadas del electrodo y pieza, lo que se podría considerar como viruta de la electroerosión, pueden ser de diferentes formas, según los materiales que componen dichos electrodos. Si la contaminación de partículas es excesiva, puede perderse rendimiento al estar refundiendo las partículas ya arrancadas.

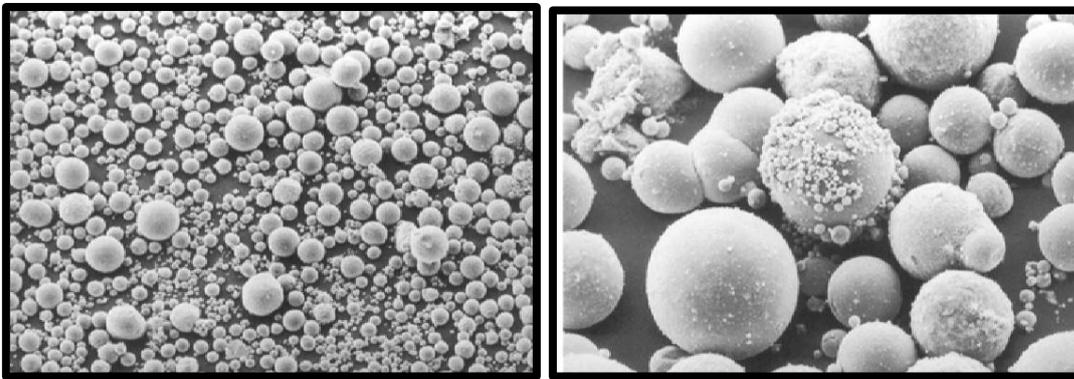


Figura 2.3, Residuos de erosión.

En general el acero suele formar partículas grandes, bien huecas o macizas, el aluminio formas espumosas y grandes, el cobre suele aparecer en formas pequeñas y el grafito y metal duro en forma de polvo fino.

2.4. Condiciones óptimas de electroerosión generales

- Los impulsos de tensión y corriente deben ser del mismo signo.
- Para cada par de materiales existe un tiempo de impulso óptimo.
- El tiempo de impulso debe variar según el tipo de dieléctrico y el sistema de difusión de calor.
- La distancia entre electrodo y pieza debe ser tal que la descarga pueda producirse.

2.5. Circuito generador de pulsos

El generador es el encargado de proporcionar la tensión necesaria para el encendido de la descarga y para su mantenimiento. Además debe limitar la corriente de las descargas, controlar su duración en el tiempo y la frecuencia de sucesión de las mismas.

Se presentan principalmente dos grupos de generadores:

- Generadores de relajación.
- Generadores de impulsos transistorizados.

Dentro de los primeros se encuentra el circuito más simple compuesto por un condensador alimentado mediante una fuente de corriente a través de una resistencia. El condensador está conectado en paralelo al electrodo y la pieza, así cuando la tensión en bornes del condensador supere la tensión de ruptura del dieléctrico, éste se ionizará y la energía almacenada en el condensador se descargará por el canal de descarga abierto en el dieléctrico, en la zona de erosión. Se puede observar la forma de onda que resulta en la Figura 2.4.

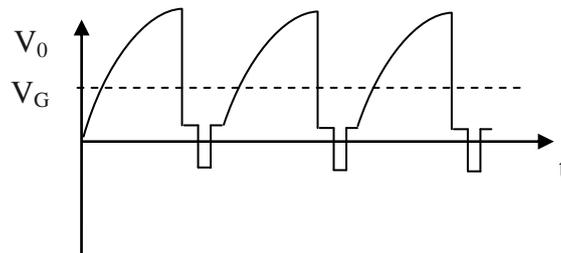


Figura 2.4, Forma de onda del circuito.

Este circuito no resulta muy efectivo ya que para aumentar la remoción de material se debe aumentar la energía de las descargas, para esto es necesario un aumento en la carga del capacitor disminuyendo la frecuencia de repetición y por lo tanto bajando el rendimiento.

Con el generador de impulsos transistorizados se logra una mejora en la eficiencia del maquinado gracias a una reducción del pico de corriente y un incremento en la duración de la descarga. En el mismo las variables como son el tiempo de impulso (t_i), tiempo de pausa (t_o) y la intensidad del impulso (i_f) pueden ser variados independientemente unos de otros. Esto hace que el proceso se adapte a cualquier condición de maquinado, evitando recalentamientos en piezas y electrodos.

Estos generadores toman corriente de la red normal alterna, trifásica a 220 ó 380 V, y la salida es un tren de impulsos consecutivos, en los que se pueden variar independientemente las variables antes mencionadas. Dicha salida se aplica directamente a los electrodos.

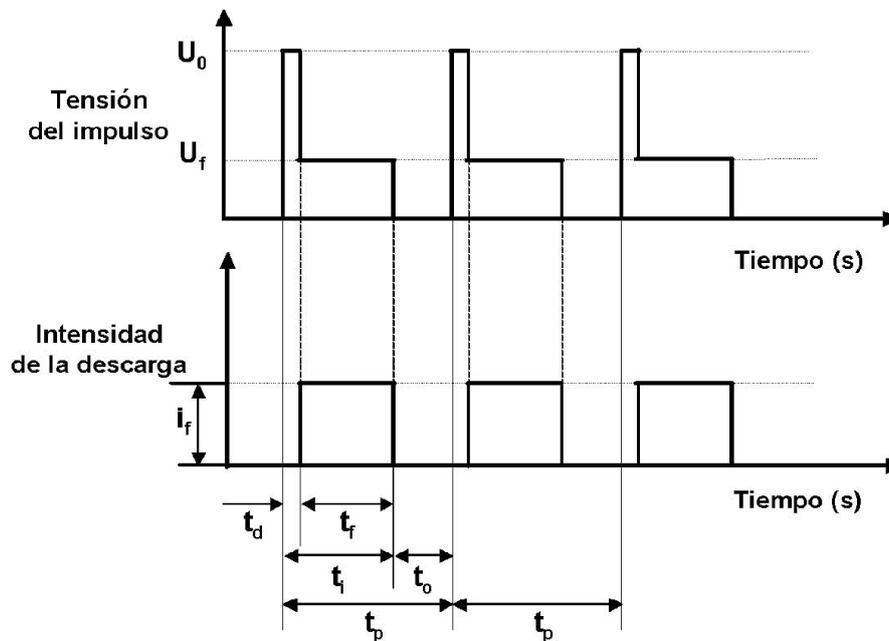


Figura 2.5, Forma de onda del circuito.

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 mucho, 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 . [Figura 2.5].

2.6. Parámetros del proceso

2.6.1. Tipos de impulsos

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.

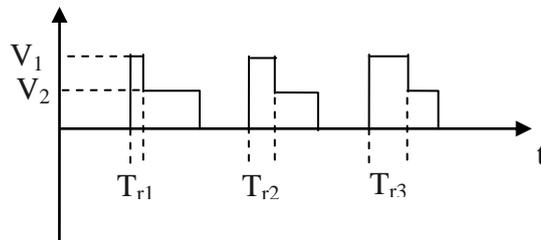


Figura 2.6, Forma de onda del circuito.

En la figura 2.6 se observan varios impulsos normales con distintos retardos, que presentan un pico de tensión V_1 correspondiente a la tensión de circuito abierto entre electrodo y pieza, y una tensión V_2 de la caída de tensión durante la descarga.

Sin embargo, durante el trabajo se producen impulsos que no presentan estas características:

- Impulso vacío.

Puede ocurrir que el gap sea demasiado grande, porque el servo no lo ha mantenido constante y se produce un impulso en el cual no hay descarga eléctrica.

Este tipo de impulso no es erosivo. Y de darse muchos impulsos de este tipo baja el rendimiento de la máquina.

- Impulso en cortocircuito.

Otras veces ocurre que los electrodos se ponen en contacto, bien directamente o bien por medio de partículas procedentes de la erosión, que tocan a ambos electrodos. Entonces la tensión entre ambos electrodos se anula.

- Arcos.

Puede ocurrir que el gap es demasiado pequeño, sin llegar a tocarse los electrodos. Entonces si la tensión de descarga (U_f) es menor de 20 V, se forman arcos voltaicos, en los que la intensidad no es controlable.



Al observar estos tipos de impulsos se puede ver cuán importante es el control del servo del sistema. Este tiene como misión mantener el gap en una distancia tal que la tensión de descarga quede fijada en un valor óptimo que está en función del tipo de máquina y del material del electrodo y la pieza.

Si no se produce descarga (impulso vacío) el servo sistema de control debe reaccionar rápidamente acercando los electrodos; si, por el contrario, se producen cortocircuitos o arcos voltaicos el servo sistema de control debe reaccionar rápidamente alejando los electrodos.

2.6.2. Potencia y energía de un impulso

Durante el proceso de electroerosión intervienen muchos factores que imposibilitan un cálculo inmediato de la energía y potencia que intervienen en el mismo. La energía de los impulsos durante el proceso de electroerosión depende de los parámetros eléctricos elegidos.

La potencia desarrollada por una corriente continua al paso por una resistencia, viene dada por:

$$P = RI = U/R$$

Donde:

U: Tensión aplicada [V].

I: Intensidad que pasa por la resistencia R [A].

R: Resistencia [Ω].

P: Potencia [w].

Si esta corriente pasa durante un cierto tiempo, se desarrolla una energía dada por:

$$W = Pt = Rit = Ut/R = UIt$$

Donde:

W: Energía [J].

t: Tiempo [s].

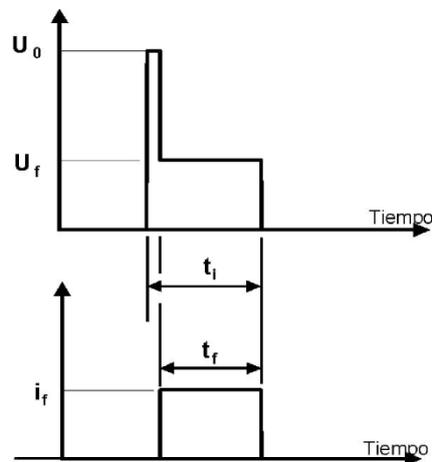


Figura 2.7, Forma de onda del circuito y variables que intervienen.

Dadas las características de los generadores de alta tensión de encendido se puede suponer $t_f \approx t_j$.

Un impulso es como una corriente continua que dura t_f (μs). La potencia de dicha corriente será:

$$P = U_f I_f$$

La energía de un impulso es:

$$W = U_f I_f t_f = P t_f$$

Como se observa, la energía de los impulsos es una función directa de su potencia.

Esto es importante ya que, al momento de la electroerosión, la cantidad arrancada de material en la unidad de tiempo dependerá de la energía del impulso. Como también la rugosidad obtenida dependerá de la energía del impulso. Cuanto mayor es dicha energía la rugosidad será mayor.

2.6.3. Valor medio de intensidad y tensión

Durante un tiempo t_f pasa una corriente i_f , luego durante el tiempo de pausa (t_o) no pasa corriente por el gap ni tampoco pasa corriente durante el tiempo de retraso del encendido (t_d).

Por tanto en un período t_p la cantidad de carga eléctrica Q que se mueve vendrá dada



por área contenida en el impulso, y será:

$$Q = i_f t_f$$

Suponiendo que todos los impulsos son iguales, se define la intensidad media como una intensidad de corriente que fuese continua, de valor I_{fm} , y que durante un período mueve la misma cantidad de carga que en un impulso de intensidad i_f .

Es decir:

- Cantidad de carga del impulso en un período $Q = i_f t_f$
- Cantidad de carga de la corriente continua en un período $Q = I_{fm} t_p$

El valor medio o intensidad media (I_{fm}) de una corriente pulsada será aquel valor con el que se cumple que las cargas recorridas por ambas corrientes, impulso rectangular (corriente pulsada) y corriente continua, son iguales (áreas iguales).

$$i_f t_f = I_{fm} t_p$$

El valor medio de la intensidad será:

$$I_{fm} = \frac{i_f t_f}{t_p}$$

Este valor medio de intensidad dará una indicación del rendimiento de arranque de material. Pero para un mismo valor se pueden tener infinidad de combinaciones de intensidad de pico, tiempo de impulso y pausa, para igual cantidad de arranque. La rugosidad y el desgaste del electrodo si variarán en cada caso.

El mismo procedimiento se utiliza para calcular la tensión media de trabajo. Igualar el área del impulso con el área de la tensión media (\bar{U}_f), durante un período t_p .

Área del impulso: $U_f t_f + U_0 t_d$

Área tensión media: $\bar{U}_f t_p$

Si se igualan: $\bar{U}_f t_p = U_f t_f + U_0 t_d$

Y por tanto la tensión media de trabajo será:



$$\bar{U}_f = \frac{U_f t_f + U_0 t_d}{t_p}$$

2.7. Terminología eléctrica

Descarga: Paso de corriente a través de algún punto del gap, debida a un impulso de tensión. Su duración se ajusta regulando el tiempo de impulso.

- Descarga isoenergética: Caso en el que se cumple que todas las descargas tienen la misma energía.
- Descarga isofrecuencial: Caso en el que se cumple que la frecuencia de descargas es constante.

Desionización: recuperación de las propiedades aislantes del líquido dieléctrico después de una descarga eléctrica en el mismo.

Frecuencia de impulso (f_p): Número de impulsos que se dan en un segundo.

Impulso de corriente: intensidad de corriente que circula entre electrodo y pieza en forma de pulso, limitada en el tiempo.

- Impulso isoenergético: Caso en el que se cumple que todos los impulsos tienen la misma energía.
- Impulso isofrecuencial: Caso en el que se cumple que la frecuencia de repetición se mantiene constante, si bien la energía en cada impulso es variable.

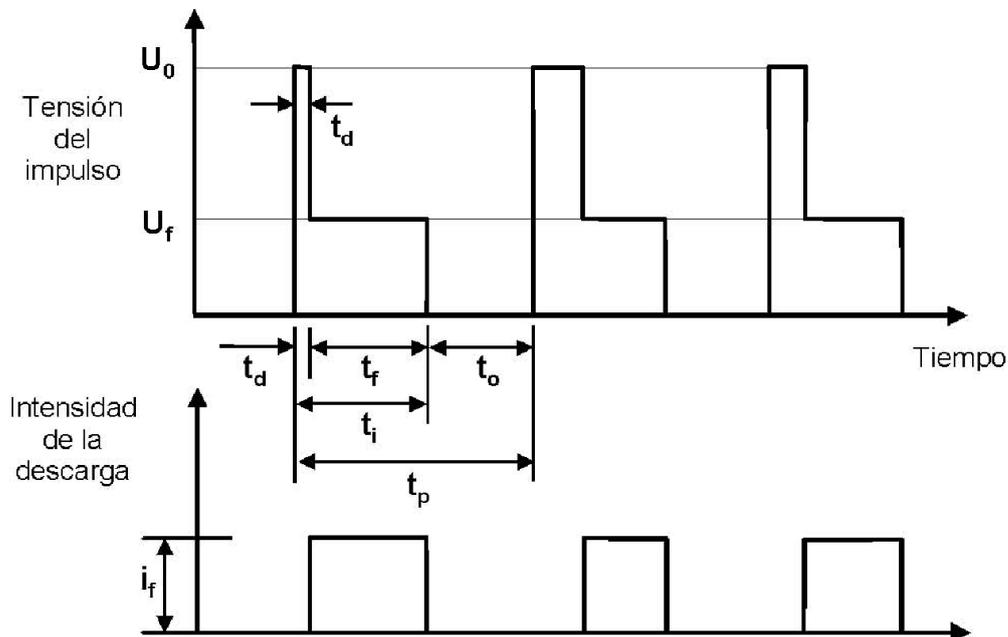


Figura 2.7, Terminología eléctrica.

Impulso de tensión: Tensión aplicada a ambos electrodos durante un tiempo determinado.

Intensidad de pico (I_f): valor máximo de corriente que circula entre electrodo y pieza.

Período (t_p): Tiempo que pasa desde el comienzo de un impulso hasta el comienzo del impulso siguiente.

Polaridad: es el potencial al que va conectado cada uno de los electrodos, según sea positivo o negativo. Se tendrá polaridad directa cuando el electrodo sea negativo y la pieza positiva, e inversa cuando suceda lo contrario.

Tensión de descarga (U_f): Tensión entre electrodo y pieza durante la descarga normal.

Tensión en vacío (U_0): Tensión entre electrodo y pieza antes de que se produzca la ionización, o tensión entre electrodos si no hay descarga.

Tiempo de descarga (t_f): Tiempo durante el cual pasa la descarga hasta que eléctricamente se corta la corriente. Intervalo efectivo.

Tiempo de impulso (t_i): Intervalo durante el cual es aplicada la tensión entre electrodo y pieza. Es más largo que el tiempo de descarga porque tiene en cuenta el tiempo de



ionización previo, antes de la descarga efectiva.

Tiempo de pausa (t_0): Intervalo de tiempo que transcurre entre el final de un impulso y el comienzo del siguiente. Durante este periodo no circula corriente entre electrodo y pieza. Durante este tiempo el dieléctrico se recupera. Se verifica que:

$$t_p = t_i + t_0$$

Tiempo de ionización (t_d): Tiempo que transcurre entre la aplicación del impulso de tensión y el comienzo de descarga. Suele ser muy pequeño, del orden de 0,5 a 2 μ s. Se cumple que:

$$t_i = t_d + t_f$$

2.8. Rugosidad

Este concepto varía en el proceso con respecto al obtenido en mecanizados convencionales por arranque de viruta. Mientras que en éstos la rugosidad es unidireccional, en la electroerosión es multidireccional.

Durante la electroerosión cada descarga produce un cráter cuyo volumen está determinado por el régimen de trabajo empleado, dependiendo entonces de la energía de cada descarga y de los materiales.

La profundidad del cráter determina el nivel de rugosidad. Si se realiza un corte perpendicular a la superficie de una pieza mecanizada se obtiene un perfil real [Figura 2.8].

Tomando una longitud de referencia se definen los valores de rugosidad media (R_a) y rugosidad máxima (R_t o R_{max}). Dicha longitud de referencia es diferente según la magnitud de la rugosidad que se vaya a medir, y viene establecida en Normas. Ambas se miden en μ m.

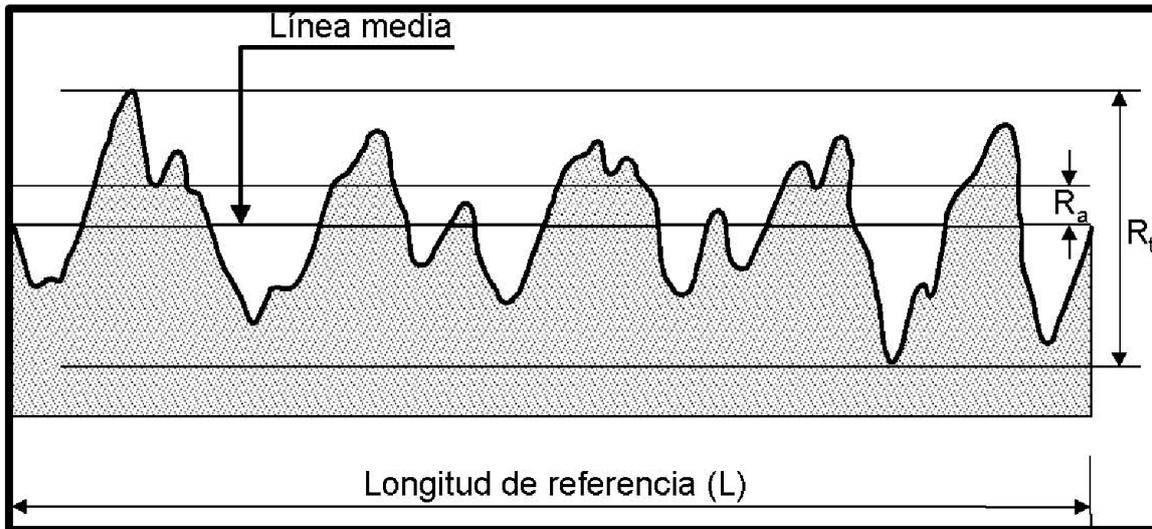


Figura 2.8, Perfil de rugosidad.

- Rugosidad media (R_a)

El valor R_a de una superficie se define como el valor medio aritmético de las distancias de los picos (en valor absoluto) del perfil real en relación con la línea media, o más simplemente como el valor medio de las diferencias hacia arriba y hacia abajo de la línea media a lo largo de una longitud de referencia preestablecida.

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |y| dx$$

- Rugosidad máxima (R_t o $R_{m\acute{a}x}$).

El valor de la rugosidad máxima se define como la distancia entre dos líneas paralelas a la línea media y que tocan al perfil por los puntos más alto y más bajo, dentro de la longitud de referencia.

- Factores de los que depende la rugosidad

En electroerosión, la rugosidad obtenida en un mecanizado depende principalmente de tres factores:

- Tiempo de impulso



- Nivel de intensidad
- Materiales de electrodo y pieza

En general se observa que:

- La rugosidad aumenta al aumentar el tiempo de impulso ya que al aumentar el tiempo sube la energía del impulso, con lo que se forman cráteres de mayor tamaño, lo cual hace aumentar la rugosidad.
- La rugosidad aumenta, al igual que el arranque de material, conforme el nivel de intensidad sea mayor. La causa es la misma que en el caso anterior. Al aumentar la intensidad aumenta también la energía del impulso, dando superficies más rugosas.
- El tipo de los materiales del electrodo y la pieza, tiene también una influencia en la rugosidad obtenida para un mismo régimen

3. Electroerosión de Titanio

El mecanizado de materiales de titanio es extremadamente complejo debido a la baja conductividad térmica y alta reactividad química. El mecanizado de estos materiales a alta velocidad de corte es muy difícil debido a un mayor desgaste de la herramienta (astillado rápido en el filo cortante, falla catastrófica y deformación plástica del filo), superficie de alta dureza, alteración grave de la microestructura y pobre calidad superficial. Durante el mecanizado convencional de estos materiales, un mayor desgaste de la herramienta y menor calidad superficial son fenómenos comúnmente observados, debido a su elevado efecto de endurecimiento por tensión, comportamiento pseudoelástico y alta tenacidad.

Para superar estos problemas, pueden ser mecanizados de manera efectiva por procesos de mecanizado no convencionales tales como mecanizado láser, mecanizado por chorro de agua (WJM), mecanizado por descarga eléctrica (EDM) y Wire-EDM (WEDM).

La tasa de eliminación de material y la integridad de la superficie son directamente proporcionales a la productividad y calidad del componente respectivamente. La calidad del mecanizado desempeña un papel vital en el rendimiento del producto. Integridad superficial en términos de rugosidad superficial, topografía, dureza de la superficie, tensiones residuales, transformación de fase y cambios microestructurales, que son los



parámetros más relevantes para cuantificar la calidad del componente en el mecanizado.

3.1. Topografía superficial

El cambio de textura se produce en la superficie mecanizada y depende en gran medida de las propiedades mecánicas del material de la pieza de trabajo y las condiciones de mecanizado. Esta asociación es más pronunciada en algunos materiales y bajo ciertas condiciones de operación. Aspinwall et al. (2008) estudió la influencia de distintos fluidos dieléctricos en la electroerosión de Ti6Al4V. Encontraron mayor presencia de micro grietas que ocurren con el agua destilada utilizada como fluido dieléctrico en comparación con queroseno. Esto es debido a la alta conductividad térmica y la mayor tasa de refrigeración del agua destilada en comparación con queroseno. Sin embargo, el queroseno como medio dieléctrico causa grietas más notables en la superficie mecanizada.

3.2. Tasa de Remoción de Material

La tasa de remoción de material es un parámetro significativo que define la productividad del electroerosionado. Esta tasa es la cantidad de material eliminado de la pieza sobre el tiempo de trabajo (mm³/min o mg/min). Define la eficiencia del maquinado

Gu et al. (2012) estudió el EDM de la aleación Ti-6Al-4V con 2 tipos de electrodos, un electrodo hecho de material aglomerado y un electrodo sólido. Durante el mecanizado con ambos electrodos, la tasa aumentó con el aumento de la corriente máxima. A una corriente más alta (> 57 A), la tasa disminuye con el electrodo sólido y con una corriente máxima de 63 A, el daño catastrófico de la pieza de trabajo y el electrodo ocurre. Pero el electrodo de material aglomerado es estable para altas descargas de energía causando la fusión y evaporación de material, por lo tanto, se puede lograr una mayor tasa de remoción. Mayor cantidad de partículas de carbono se depositaron en la superficie del electrodo sólido que del electrodo aglomerado. El GAP disminuye el efecto de aislamiento del medio dieléctrico que conduce a una descarga inestable debido a limitaciones de circulación del fluido dieléctrico.

Lin et al. (2000) también estudió la tasa de remoción de material para EDM combinado con maquinado por ultra sonido (USM) de aleación Ti6Al4V usando queroseno y agua desionizada con concentración abrasiva de SiC como dieléctricos. Demostraron que,



cuando la concentración de abrasivo es demasiado alta, muchos granos de SiC se acumularán en el espacio de descarga entre el electrodo y la pieza de trabajo y se asentaran en la superficie maquinada, causando una descarga eléctrica inestable y reduciendo el MRR. Se observó que la tasa de remoción es más alta para el agua destilada en comparación con queroseno.

3.3 Rugosidad de la superficie

La rugosidad de la superficie es un parámetro importante que influye en el rendimiento de los componentes mecanizados, además depende del tipo de contacto, precisión, fricción y deformación. Hay varios parámetros de mecanizado que cuantifican la rugosidad de la superficie, como por ejemplo los parámetros de amplitud que caracterizan la topografía superficial.

El parámetro de altura promedio aritmética (R_a), también conocido como el promedio de la línea central, es el parámetro de rugosidad más universalmente utilizado para el control de calidad general [Gadelmawla et al, 2002]. Además, es importante tener en cuenta también el tamaño de los poros (distancia entre picos) para permitir un crecimiento de tejido óseo hacia el implante que mejore la sujeción del mismo [Lewallen et al, 2015]. La selección de parámetros EDM o WEDM es un criterio importante para lograr un mejor acabado superficial para materiales basados en Ti.

La rugosidad de la superficie en EDM depende de la intensidad de la chispa y el tamaño del cráter producido durante el mecanizado en diferentes intervalos de duración de pulso. La rugosidad superficial de la aleación Ti6Al4V luego de ser tratada con EDM se ve afectada significativamente por la corriente de descarga (67%), el factor de servicio (17%) y la duración del pulso (14%) [Kao et al, 2010]. De ese estudio queda claro que la rugosidad superficial varía principalmente debido a la corriente de descarga seguida de la duración del pulso. Para una mejor rugosidad de la superficie, se requiere una menor corriente de descarga y una menor duración del pulso. La rugosidad de la superficie también se ve afectada por la selección del material de la herramienta para mecanizar la aleación Ti6Al4V.

3.4 Metalurgia de superficie

Durante el mecanizado con electroerosión, la superficie de la pieza de trabajo está expuesta a energía térmica, mecánica y química, lo que provoca cambios en la



superficie y las propiedades subsuperficiales debido a la alta temperatura a la que es sometida y el efecto de enfriamiento. La capa superficial mecanizada de la pieza de trabajo siempre sufre varios tipos de alteraciones metalúrgicas. La integridad de la superficie se ve afectada por la deformación plástica durante el mecanizado.

Estos cambios que ocurren en la superficie del material están influenciados por las condiciones de mecanizado, tales como los parámetros eléctricos y no eléctricos.

3.5 Formación de láminas

La capa superficial característica se forma debido a resolidificación de material fundido, alta temperatura y al efecto de rápido enfriamiento. Es esencial entender la formación de capas para minimizar su espesor durante el proceso de mecanizado. La formación de capas ocurre bajo las circunstancias de mayor corriente de descarga y duración del pulso con condiciones insuficientes de circulación y lavado. La evaluación de la formación de capas se basa en la corriente de descarga, la duración del pulso, el tipo de fluido dieléctrico y la presión de recirculación.

Haskalik y Caydas (2007) han estudiado el efecto de la corriente máxima en el espesor de la capa refundida (alrededor de 11 mm) del componente Ti-6Al-4V concluyendo que la capa aumenta su espesor a mayor corriente. Tal vez, debido a la producción de cráteres más profundos y más grandes, derrite una mayor cantidad de material de la superficie de trabajo y se solidifica sobre superficie mecanizada.

3.6 Tensiones residuales superficiales

Las tensiones residuales en la superficie originan fisuras en la capa de refundición y esta penetra en el bulk de la pieza cuando el estrés supera a la tensión de resistencia del material. Las tensiones aumentan debido al rápido calentamiento y enfriamiento del material por el fluido dieléctrico [Haskalik et al, 2007]. Las tensiones residuales de tracción se mantienen constantes en especímenes procesados por EDM y tienen pobre resistencia a la fatiga. Estas tensiones residuales pueden eliminarse mediante posteriores tratamientos térmicos [Stasky et al, 2011]. La superficie erosionada contiene cráteres, agujeros de soplado, gotas derretidas, desechos y laminaciones; estos defectos pueden desviar la distribución de las tensiones residuales de manera considerable [Ekmekci et al, 2005].

Durante el EDM/WEDM con agua destilada como medio dieléctrico, la solidificación del material fundido es muy rápida a temperaturas más altas, lo que provoca variaciones



en la capa superficial maquinada. La dureza de la superficie mecanizada mediante EDM/WEDM puede variar con diferentes fluidos dieléctricos.

Aspinwall et al. (2008) estudió la microdureza de la aleación Ti-6Al-4V luego de ser sometida a EDM y concluyó que no ha ocurrido alteración de microdureza de la superficie mecanizada incluso luego de repetidas pasadas. Además, concluyó que utilizar un alto voltaje causa el aumento de microdureza hasta una profundidad de 5 μm solamente.



4. Objetivos

Objetivo general: evaluar el proceso de electroerosión sobre probetas de Ti-6Al-4V, obteniendo los parámetros óptimos del proceso para asegurar las características requeridas en los implantes, además de corregir los defectos superficiales por la presencia de fisuras o poros. A partir de ello, determinar la factibilidad de su aplicación a la producción de implantes a escala industrial.

Objetivos particulares:

- Construir un dispositivo para efectuar los ensayos de electroerosión.
- Determinar los parámetros operativos para obtener las características requeridas de los implantes.
- Determinar las características superficiales de las probetas electroerosionadas: rugosidad, dureza, presencia de compuestos.
- Evaluar la influencia de los parámetros del proceso sobre las características superficiales.



5. Metodología experimental

Fue realizado el tratamiento superficial por electroerosión sobre probetas de titanio grado V (Ti6Al4V). Para evaluar el comportamiento del material ante el tratamiento, se variaron parámetros del proceso con el fin de observar si bajo alguna de estas distintas condiciones se obtenían características superficiales adecuadas para satisfacer los requerimientos funcionales de los implantes tales como dureza, rugosidad, composición química y contaminación superficial.

5.1. Material

Se utilizó titanio grado V (Ti6Al4V ELI), provisto en forma de varilla cilíndrica de 5 mm de diámetro y 1050 mm de largo. La composición química y propiedades mecánicas (comparadas con titanio grado II y IV) son:

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 5.1 Composición química de Ti-6Al-4V.



Grado	Resistencia a la Tracción		Límite de Fluencia 0,2%		Elongación en 4D	Reducción de Area
	Ksi	Mpa	Ksi	Mpa	% mín	% mín
2	50	345	40	275	20	30
4	80	550	70	483	15	25
Ti6Al4V Eli	125	860	115	795	10	25

Tabla 5.2 Propiedades mecánicas de Titanio Grado II, IV y V.

	Resistencia a la tracción (Mpa)	Densidad (g/cc)	Relación resistencia a la tracción/densidad	Relación relativa a Titanio Grado 2 (%)	Relación relativa a Titanio Grado 4 (%)	Relación relativa a Titanio Ti6Al4V Eli (%)
2	345	4.51	76	100	63	40
4	550	4.47	123	160	100	64
Ti6Al4V Eli	860	4.42	194	249	156	100

Tabla 5.3 Comparación de propiedades mecánicas en distintos tipos de Titanio.

5.2. Probetas y electrodos

Para confeccionar las probetas se efectuaron cortes mediante el torno paralelo del taller de mecánica de la Facultad de Ingeniería, utilizando una lama como herramienta de corte y usando agua destilada como refrigerante. Cada probeta contaba con 10 mm de longitud. Para el acabado final de las superficies planas se realizó un limado manual para eliminar las rebabas más gruesa que generó el torneado, y luego un pulido manual con lijas al agua de granulometría gradualmente creciente (100, 220, 400 y 1000).

De la misma varilla, y usando el mismo método de corte, se fabricaron los electrodos con los cuales se llevarían a cabo los ensayos. Se cortaron 2 sets de electrodos de diferente longitud (30 mm y 60 mm) para probar en la electroerosionadora y determinar



cuál era el largo más apropiado teniendo en cuenta las limitaciones que presentaba el movimiento vertical del cabezal y la altura a la que era posible ubicar la cuba electrolítica. Sobre las superficies planas se realizó el mismo acabado que con las probetas.

5.3. Construcción de dispositivos y accesorios

El trabajo en el taller comenzó con la búsqueda de las herramientas con las que se fabricarían los elementos necesarios para poder realizar los ensayos. Se eligió un jarro de acero inoxidable para cumplir la función de cuba electrolítica y luego fue diseñado un porta-probetas a partir de una barra hexagonal maciza de latón.

Al diseñar el porta-probetas se tomó como parámetro limitante el diámetro de la cuba (115 mm) y se decidió realizarlo de manera que pueda sostener tres probetas para poder realizar los ensayos de manera más dinámica. Las mismas serían sujetadas por tornillos laterales para impedir que se muevan durante la manipulación y el ensayo, para esto se efectuaron agujeros y roscas 3 x 0,5. En la Figura 5.1 puede observarse el plano:

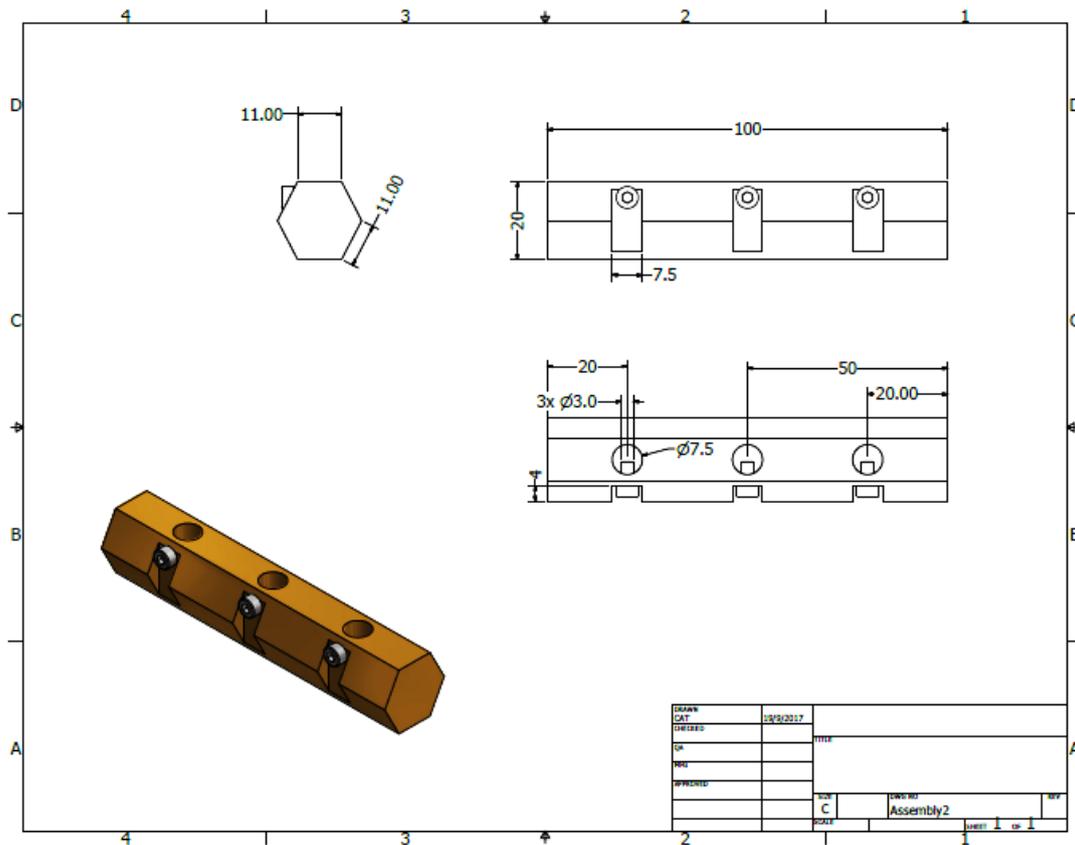


Figura 5.1, Plano del porta-probetas.

Finalmente se taladró un agujero con una rosca de un cuarto de pulgada por 20 hilos en uno de los laterales planos del porta-probetas para atornillar el terminal eléctrico que permitiría cerrar el circuito de la electroerosionadora.

Se fabricó el mismo mediante una máquina fresadora, un torno paralelo y un taladro vertical del taller mecánico de la Facultad de Ingeniería. [Figuras 5.2 y 5.3].



Figura 5.2, Imagen tomada luego de haber hecho los asientos para las probetas.



Figura 5.3, Aplanado realizado para poder realizar los agujeros roscados que mantendrán inmóviles a las probetas.



Figura 5.4, Imagen del porta-probetas terminado.

Para fabricar el recipiente se realizó un corte transversal usando un torno paralelo. Realizar el corte, como se observa en la figura 5.5, causó que este sea irregular por lo que se efectuó un nuevo corte, pero esta vez usando como soporte interno un taco de madera cilíndrico mecanizado previamente [Figura 5.6 y 5.7].



Figura 5.5, Disposición del recipiente para realizar el primer corte.



Figura 5.6, Preparación del taco de madera para ser mecanizado.

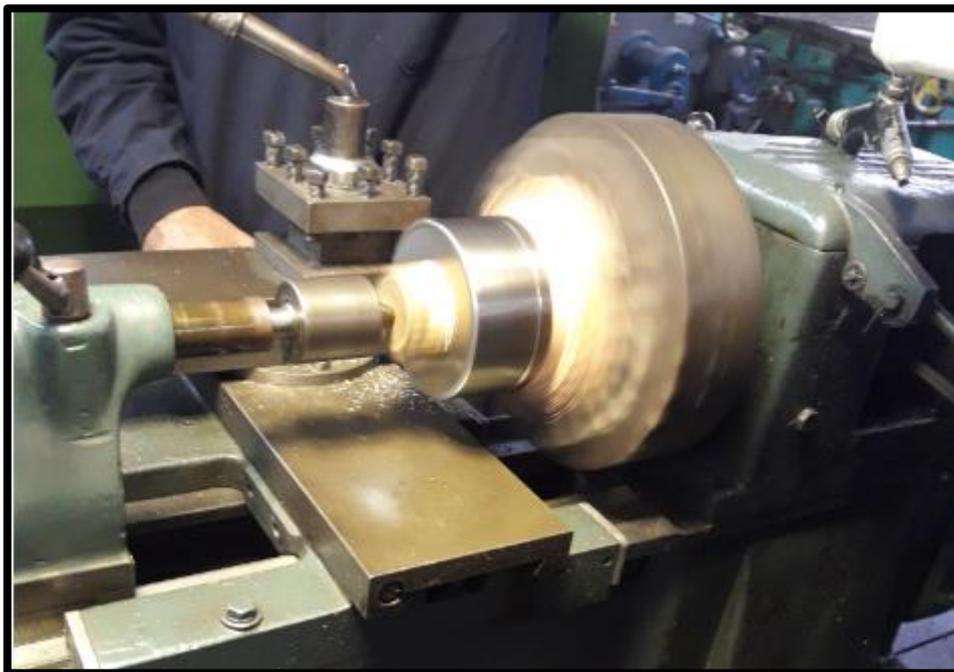


Figura 5.7, Mecanizado del taco de madera.

Una vez el segundo corte fue realizado se limó el borde para eliminar rebabas y se colocó un burlete de goma como protección.



Figura 5.8, Cuba terminada.

Por último se acondicionó una bomba de agua que se encontraba en el taller para poder utilizarla en nuestros ensayos.

Al comenzar con los ensayos de electro-erosionado de prueba se presentaron dos problemas que harían reconsiderar el recipiente modificado para usar como cuba electrolítica. Primero, el espacio que quedaba para ubicar los elementos involucrados resultaba reducido. Además se imposibilitaba ver la superficie de la probeta, lo cual dificulta el alineamiento entre la misma y el electrodo ocasionando problemas al comparar resultados entre ensayos si las áreas erosionadas no eran iguales.

Para solucionar los inconvenientes se consideró conseguir un recipiente de un diámetro mayor (150 mm) y de vidrio.

5.4. Tratamiento superficial por EDM

La primera prueba consistió en observar si la superficie previa al ensayo tenía algún tipo



de influencia sobre los resultados de electroerosión. Para esto se preparó la superficie de las probetas usando lima manual, pulido manual y piedra rectificadora. Luego, mediante microscopio óptico se observó la superficie antes de ser erosionada, en busca de inclusiones, y luego del ensayo, para registrar si había diferencias que justifiquen preparar la superficie de una determinada manera.

Una vez realizadas las electroerosiones de pruebas empleando el equipo de electroerosión marca EDUCA 10 disponible en el Taller de la Facultad de Ingeniería, se procedió a establecer las condiciones bajo las cuales se efectuaron los ensayos. [Figura 5.9].

Se dividieron las probetas en cuatro grupos de 2 probetas cada uno, y uno de 3 probetas para ser sometidos a electroerosión bajo diferentes condiciones de potencia y gap. Para llevar a cabo los ensayos se utilizaron 2 electrodos del mismo material que las probetas. Tanto los electrodos como las probetas fueron pulidos. Todas las demás variables fueron iguales para todos los ensayos y se estableció una distancia de 0.1 mm de profundidad de electroerosión, la cual es suficiente para realizar las distintas mediciones para evaluar y comparar las muestras.

- Electrodo de Ti-6Al-4V.
- Agua destilada como fluido dieléctrico. Esta fue reemplazada en su totalidad luego de cada ensayo para eliminar residuos generados por el proceso.
- Polaridad de probeta: Positivo.



Figura 5.9, Tablero de la electroerosionadora EDUCA 10.

Luego de realizar la totalidad de los ensayos se identificó cada muestra mediante un lápiz eléctrico en los laterales de las mismas previamente a ser analizadas.

5.5. Caracterización superficial

Sobre las probetas electroerosionadas fueron realizados análisis de rugosidad, morfología, dureza, difracción de rayos X (con el fin de identificar los compuestos presentes en la superficie erosionada) y de metalografía.

5.5.1. Topografía superficial

Se observaron las muestras bajo el microscopio óptico del laboratorio de microscopía perteneciente INTEMA a diferentes aumentos (5x, 10x, 20x y 50x) con el fin de hacer un primer relevamiento de posibles defectos (fisuras, pitting, material redepositado) y, de encontrar anomalías, realizar una selección de probetas para luego ser observadas mediante microscopía electrónica.

Estas observaciones también se realizaron sobre los electrodos, que previamente debieron ser cortados para poder ser posicionados en el microscopio. Estos cortes se realizaron mediante una sierra circular con filo de diamante, como se observa en la Figura 5.10, también perteneciente al laboratorio de microscopía de INTEMA, usando agua destilada como lubricante y refrigerante, en lugar de aceite, para evitar contaminar los electrodos.



Figura 5.10, Sierra circular con filo de diamante utilizada para cortar los electrodos.

Una vez seleccionadas las muestras en base a las observaciones realizadas se procedió a

hacer un análisis de morfología más detallado mediante microscopía SEM con un microscopio ubicado en la facultad de ciencias exactas de la UNMDP, marca Joel JSM-6460LV.

Se eligió para la observación una probeta de cada grupo de condiciones de ensayo y ambos electrodos, y se posicionaron como muestra la Figura 5.11. Mediante distintos niveles de zoom (25x, 200x, 1000x, 5000x y 10000x) se buscó identificar variaciones en las características superficiales que pudieran resultar de interés (tamaño y forma de los poros, fisuras, material redepositado). Además se generaron imágenes usando la técnica de retrodifundido para detectar posibles defectos infra superficiales.



Figura 5.11, Probetas posicionadas para ser observadas mediante microscopio electrónico.

A continuación fue realizado el relevamiento de rugosidad usando como valor de referencia el parámetro R_a , el cual representa la rugosidad media aritmética del perfil de rugosidad. Este análisis se llevó a cabo con una probeta de cada grupo y con uno de los electrodos.

Sobre cada muestra se efectuaron 3 determinaciones en diferente dirección obteniendo gráficos y valor de R_a cada una. Luego de de realizar estas mediciones las muestras fueron sometidas a un lavado en ultrasonido con agua destilada [Figura 5.12] para luego volver a medir rugosidad. El propósito de esto fue analizar si mediante pequeñas vibraciones se producía desprendimiento de material redepositado reduciendo la rugosidad superficial y afectando de forma negativa el desempeño del mismo.



Figura 5.12, Lavado realizado con ultrasonido con agua destilada.

5.5.2. Identificación de compuestos superficiales

La identificación del estado de combinación química de los elementos presentes en la superficie de las probetas fue determinado mediante difracción de rayos-X (DRX) con un rango de 2θ de 30° a 90° (paso de $1^\circ/\text{min}$).

El análisis se realizó sobre una probeta electroerosionada y una sin erosionar con el fin de averiguar si se produce un cambio en la proporción de compuestos superficiales presentes en la superficie. Los compuestos presentes en la aleación Ti6Al4V son α y β de estructuras atómicas HCP (compacta hexagonal) y BCC (cúbica centrada en el cuerpo) respectivamente.

Para analizar los resultados generados mediante difracción utilizamos un software de cristalografía llamado PowderCell y patrones de difracción conocidos de los compuestos α y β de titanio disponibles en una base de datos online [Misasa]. Los datos de space-group y celda de cada compuesto se listan a continuación con su correspondiente gráfico:



- Fase α

Space-group	194				
a	b	c	α	β	γ
2.950	2.950	4.686	90	90	120

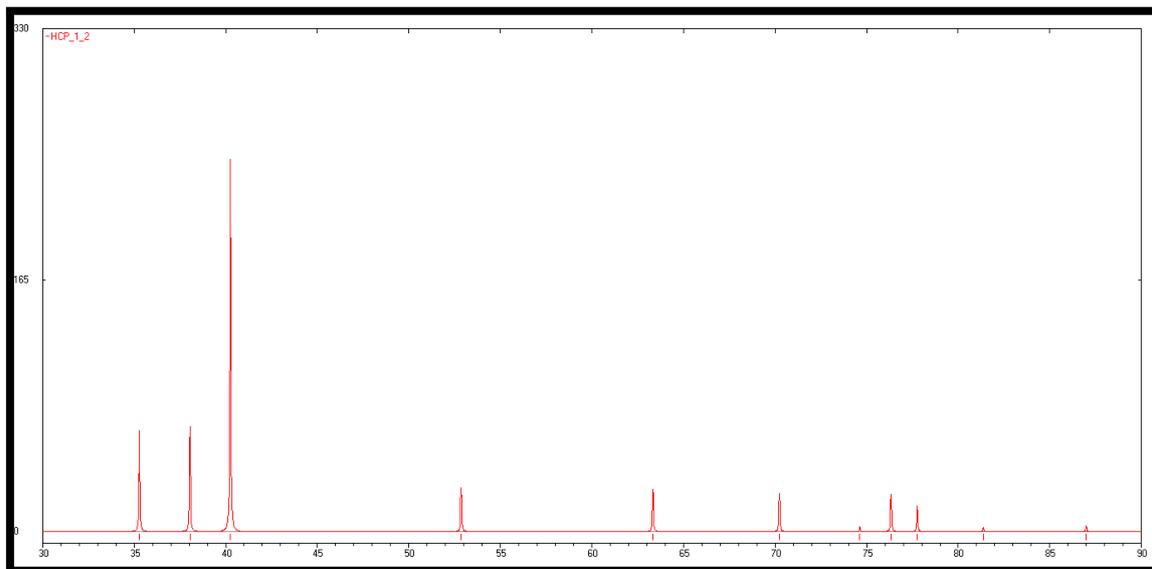


Figura 5.13, Patrón de difracción.

- Fase β

Space-group	229				
A	b	c	α	β	γ
3.3065	3.3065	3.3065	90	90	90

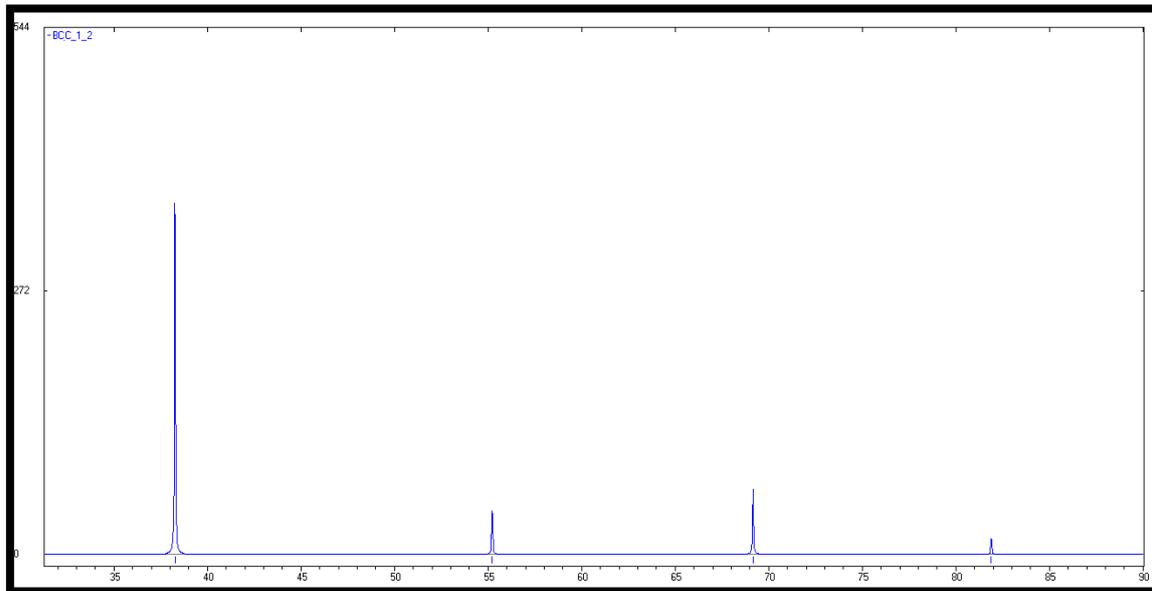


Figura 5.14, Patrón de difracción.

Para determinar las proporciones presentes de cada compuesto en la superficie se superponen los gráficos de cada fase con el gráfico obtenido por difracción y mediante la función descomposición + refinamiento del programa PowderCell se aproximan los picos teóricos a los medidos.

5.5.3. Análisis metalográfico

Con el fin de poder observar cambios en las características microestructurales de las muestras electroerosionadas, se efectuó un análisis metalográfico de las mismas. Se eligieron dos probetas, una ensayada con potencia máxima (C3) y otra con potencia mínima (A1), y un electrodo (1). Los mismos fueron cortados de forma transversal y posicionados, como se observa en la Figura 5.15, en un disco de baquelita para su conveniente manipulación.

Se realizó un desbaste grueso con papel de lija, disminuyendo el tamaño de grano y rotando el disco hasta llegar al papel de menor tamaño de grano. Luego se procedió al desbaste fino, mediante una rueda giratoria húmeda cubierta con un paño cargado con alúmina.

Finalmente se lo ataco por ocho segundos con reactivo Krolls compuesto por:

- 92% agua destilada
- 6% ácido hidrofúorhídrico
- 2% ácido nítrico



Figura 5.15, Disco con las muestras A1, C3 y electrodo 1 incluidos.

Luego fueron tomadas las imágenes en el microscopio óptico antes mencionado.

5.5.4. Determinación de Dureza

Se buscó determinar si existían cambios en las durezas después de la electroerosión, para ello se efectuaron mediciones de microdureza Vickers en las probetas (A1 y C3) y electrodo (1) cortados anteriormente de forma transversal.

Utilizando el equipo indentador disponible en el laboratorio de Metalurgia de la Facultad de Ingeniería de la UNMDP se obtuvieron dos valores promedio conformados por tres mediciones cada uno en distintas áreas, tanto del interior del material como de la zona afectada por la electroerosión para cada probeta. Respecto de información precedente no se esperaba hallar un cambio notable entre ambas zonas.



6. Resultados

6.1. Tiempos de ensayos obtenidos

Los tiempos relevados en cada ensayo para electroerosionar 0,1 mm en las diferentes condiciones planteadas se listan en la tabla 1 y se grafican en la figura 6.1 (el valor de potencia para nivel 5 corresponde a 800 VA):

Tabla 1. Parámetros de operación de la electroerosionadora

Condición de ensayo	Probeta	Nivel de Potencia	Gap	Tiempo [s]
A	1	1	8,5	487
	2	1	8,5	383
B	1	3	8,5	125
	2	3	8,5	86
C	1	5	8,5	120
	2	5	8,5	123
	3	5	8,5	118
D	1	3	6,5	240
	2	3	6,5	255
E	1	5	10	99
	2	5	10	63

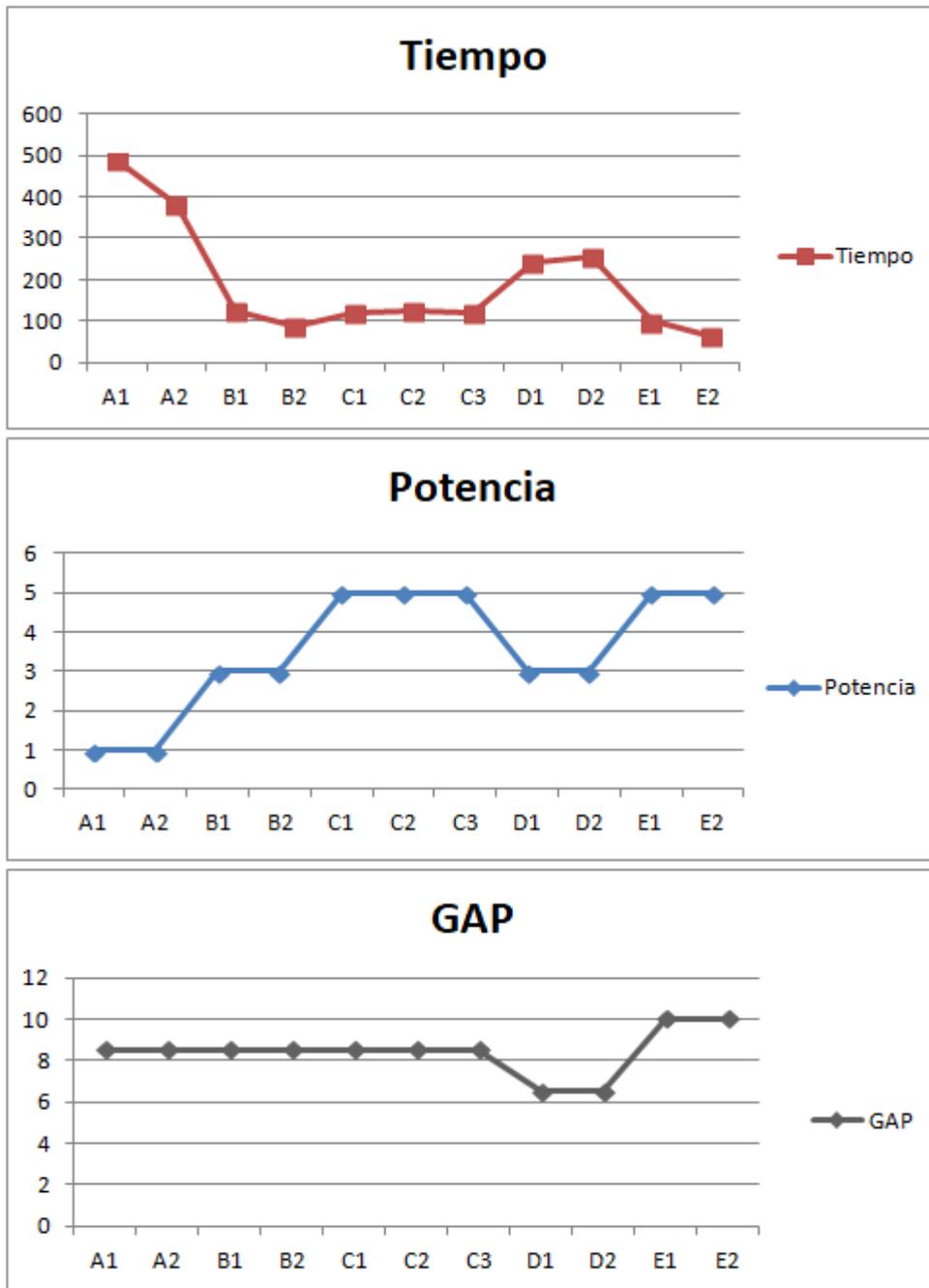


Figura 6.1. Parámetros de operación de la electroerosionadora.

En términos generales puede observarse como el tiempo que se demora en electroerosionar una décima de milímetro disminuye al aumentar la potencia y el gap (ensayos C y E). Otras observaciones que pueden hacerse a partir de la tabla son: que pasar de potencia intermedia a alta no produce una disminución apreciable en el tiempo



como podría esperarse al ver la variación que provoca pasar de potencia baja a intermedia y la influencia del gap en el tiempo total de electroerosionado que aumenta considerablemente ante una leve baja de gap (ensayo D).

Las diferencias de tiempo presentes entre probetas ensayadas en igualdad de condiciones (particularmente condiciones A y B) pueden deberse a errores de planidad en las probetas y/o electrodos (haciendo que al principio el área de trabajo sea menor) y a error de alineación entre probeta y electrodo (ocasionando un área de trabajo menor durante la totalidad del erosionado).

6.2. Topografía superficial

La información utilizada para analizar la topografía de muestras ensayadas y electrodos la obtuvimos de observar a través de microscopio óptico, microscopio electrónico y mediciones de rugosidad.

6.2.1. Imágenes obtenidas en microscopio óptico

Las imágenes tomadas mediante microscopio óptico, tanto de las probetas como de los electrodos usados, se listan a continuación ordenadas de acuerdo a las condiciones de ensayo. Al tomar las imágenes se quería constatar los cambios producidos sobre la superficie al electroerosionar las muestras y cómo influía la modificación de las diferentes variables del proceso.

En las mismas se ha podido revelar: la presencia de material redepositado sobre la superficie erosionada (Figuras 6.2, 6.5 y 6.6), múltiples fisuras y pitting (Figuras 6.4 y 6.6) y la presencia de poros (Figura 6.5).

- Probetas:

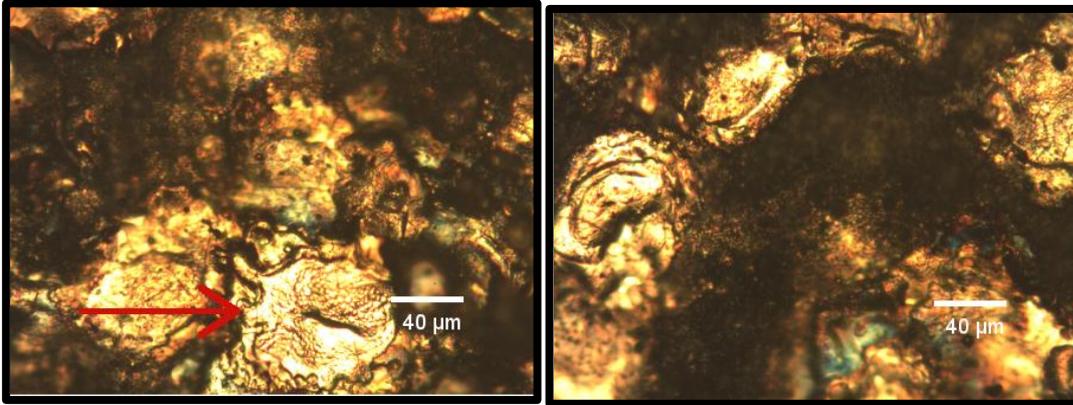


Figura 6.2, Micrografía de las superficies electroerosionadas en condición A para las probetas A1 y A2 respectivamente. (20X) (material redepositado).

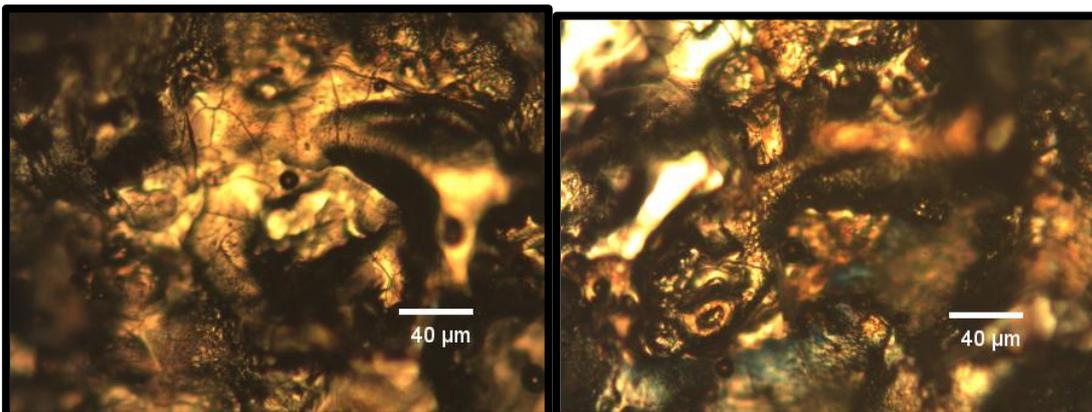


Figura 6.3, Micrografía de las superficies electroerosionadas en condición B para las probetas B1 y B2 respectivamente. (20X).

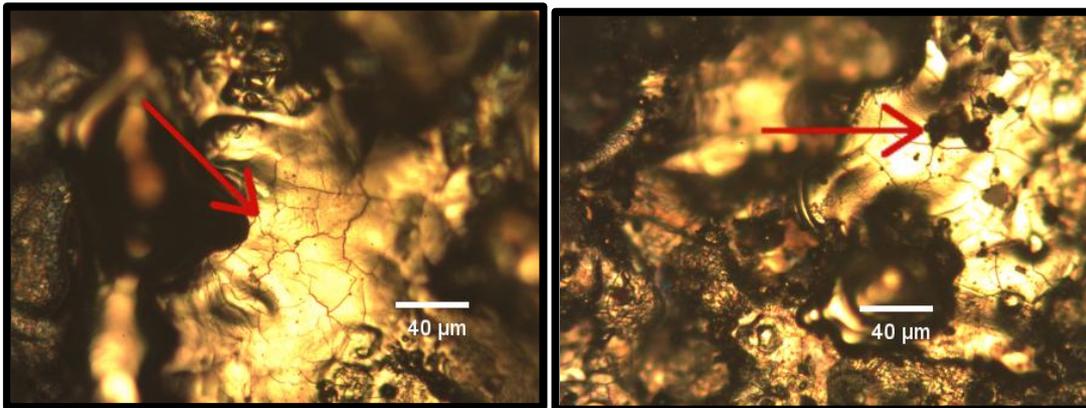


Figura 6.4, Micrografía de las superficies electroerosionadas en condición C para las probetas C1 y C2 respectivamente. (20X) (Presencia de fisuras y pitting)

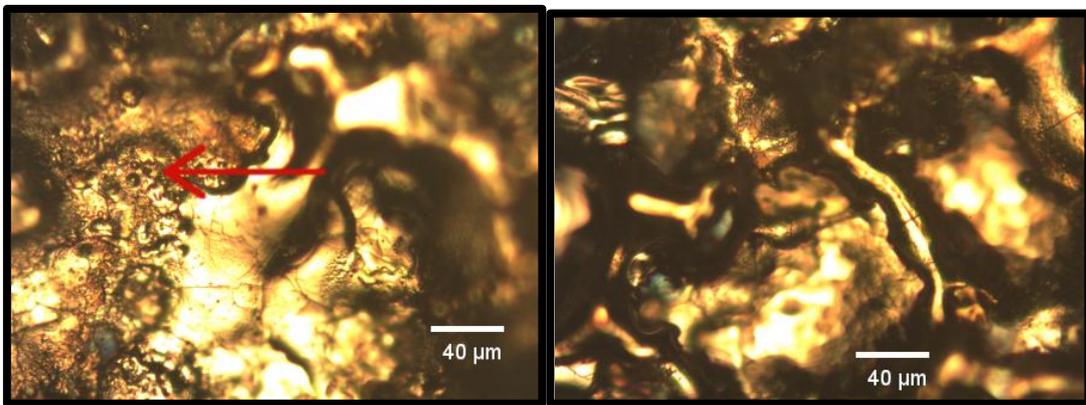


Figura 6.5, Micrografía de las superficies electroerosionadas en condición D para las probetas D1 y D2 respectivamente. (20X) (material redepositado y presencia de poros).

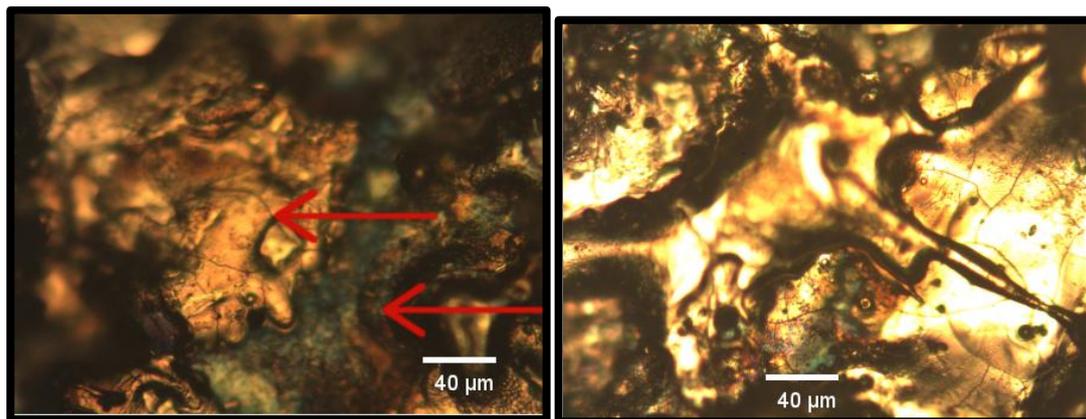


Figura 6.6, Micrografía de las superficies electroerosionadas en condición E para las probetas E1 y E2 respectivamente. (20X) (material redepositado)

- Electroodos:

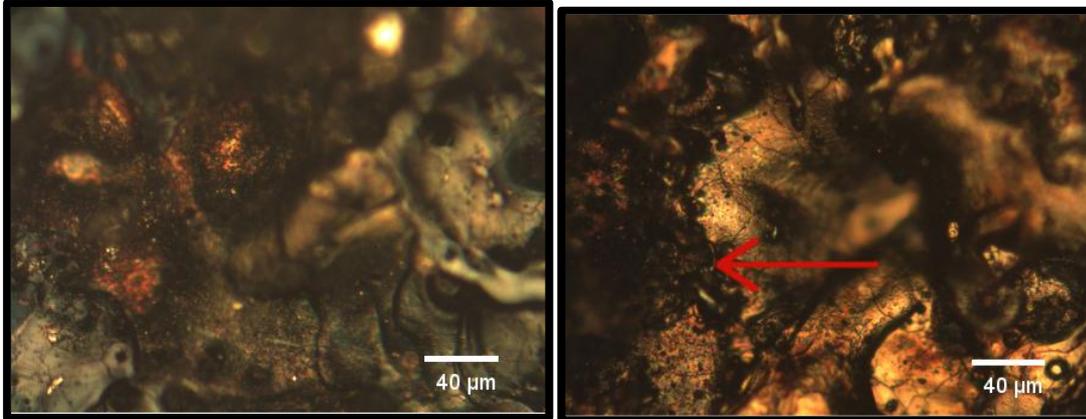


Figura 6.7, Micrografía de las superficies para los electrodos G y H respectivamente. (20X) (material redepositado).

Las mayores diferencias observadas se presentaron respecto de las potencias aplicadas, notándose mayor cantidad de material refundido, manchas y fisuras para mayores potencias. También se aprecia en estas imágenes que la superficie del electrodo termina más “sucio” que las probetas; lo cual confirma que la polaridad elegida para realizar el ensayo es la correcta.

6.2.2. Imágenes obtenidas en microscopio electrónico

Al realizar imágenes con mayores aumentos en el microscopio óptico, se presentó la dificultad de enfocar correctamente las imágenes, notándose grandes diferencias de relieve. Para salvar esta dificultad se decidió seleccionar las muestras más representativas y analizarlas en el SEM. Por lo mismo se busco obtener mayor detalle de defectos empleando el microscopio electrónico (SEI). A su vez permitía constatar, mediante el modo retrodifundido (BES), la existencia o no de diferencias en cuanto a composición química superficial.

De la selección de probetas realizadas a partir de lo observado mediante microscopio óptico se obtuvieron las siguientes imágenes generadas por microscopía electrónica de barrido (SEM).

Las probetas fueron elegidas tomando como criterio las que presentaban menor

homogeneidad, ya que si resultan aceptables las condiciones menos favorables, el resto también lo será.

En las muestras se ha podido observar con mayor detalle: la presencia de material redepositado sobre la superficie erosionada (Figuras 6.8, 6.9, 6.12 y 6.14), múltiples fisuras y pitting (Figuras 6.8, 6.9, 6.10 y 6.11) y la presencia de poros (Figura 6.13).

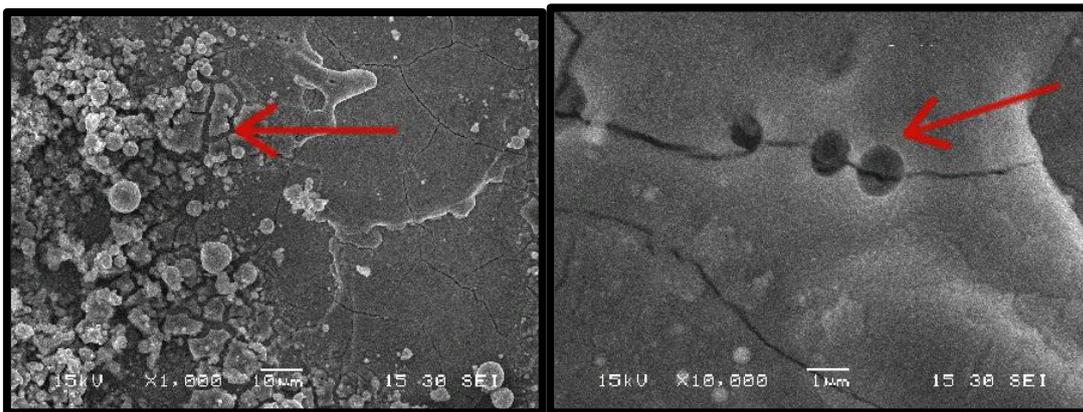


Figura 6.8, Probeta A2 con aumentos de 1000x y 10000x respectivamente. (Material redepositado y presencia de poros y fisuras)

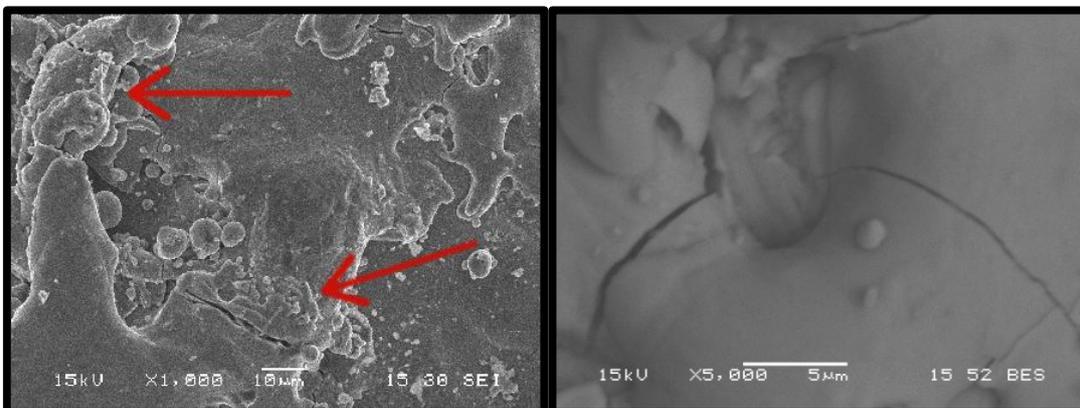


Figura 6.9, Probeta B1 con aumentos de 1000x y 5000x retrodifundido respectivamente. (Material redepositado)

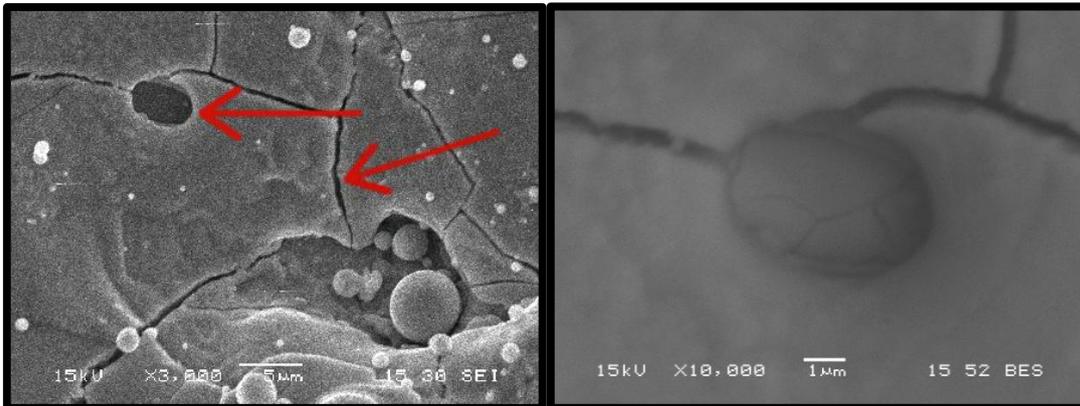


Figura 6.10, Probeta C2 con aumentos de 3000x y 10000x retrodifundido respectivamente. (Poros y fisuras)

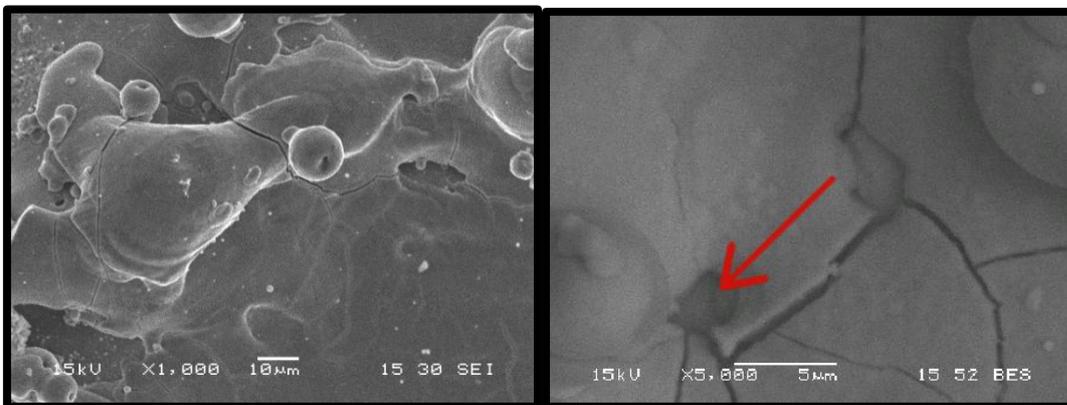


Figura 6.11, Probeta D2 con aumentos de 1000x y 5000x retrodifundido respectivamente. (Presencia de poros)

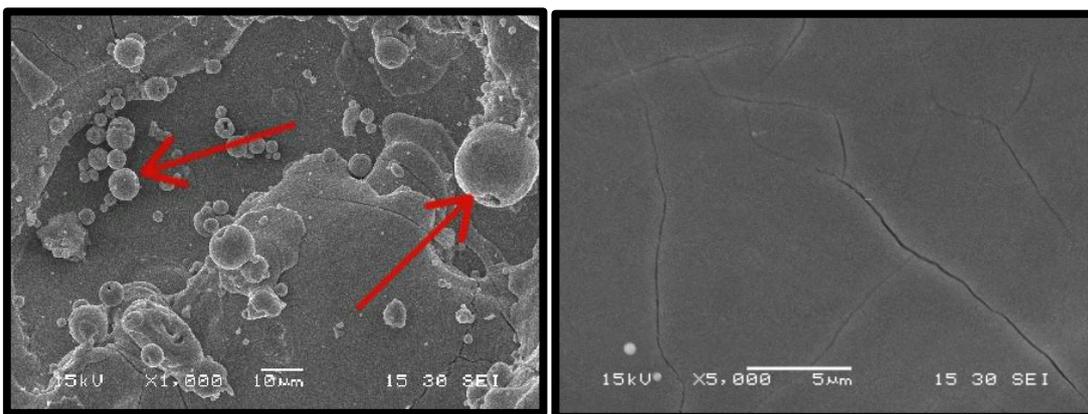


Figura 6.12, Probeta E1 con aumentos de 1000x y 5000x respectivamente. (Material redepositado de forma esferoidal)

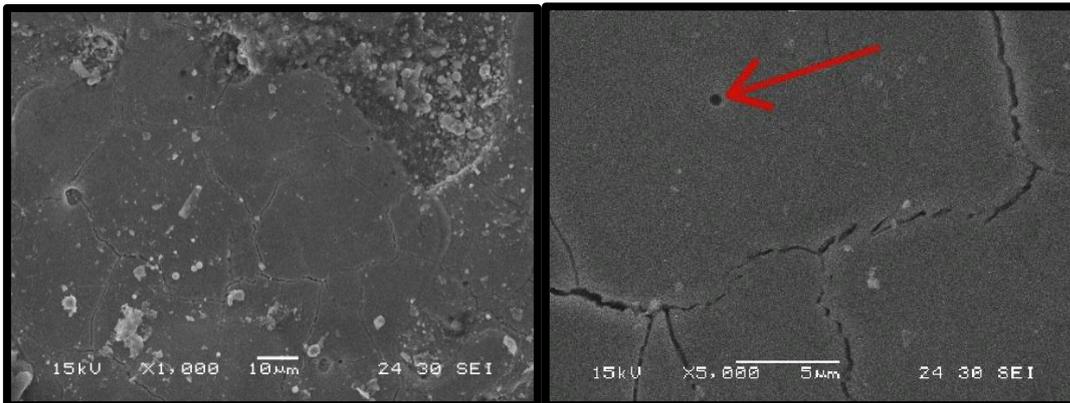


Figura 6.13, Electrodo G con aumentos de 1000x y 5000x respectivamente. (Micro poros)

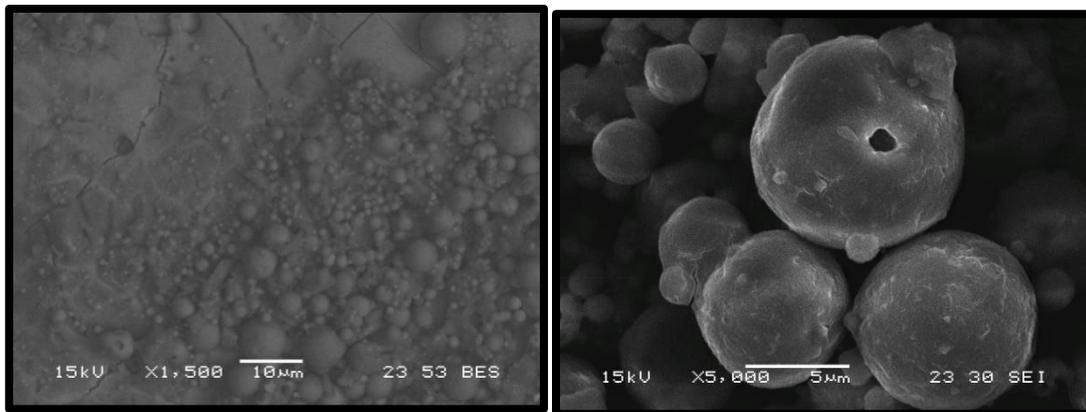


Figura 6.14, Electrodo H con aumentos de 1500x retrodifundido y 5000x respectivamente.

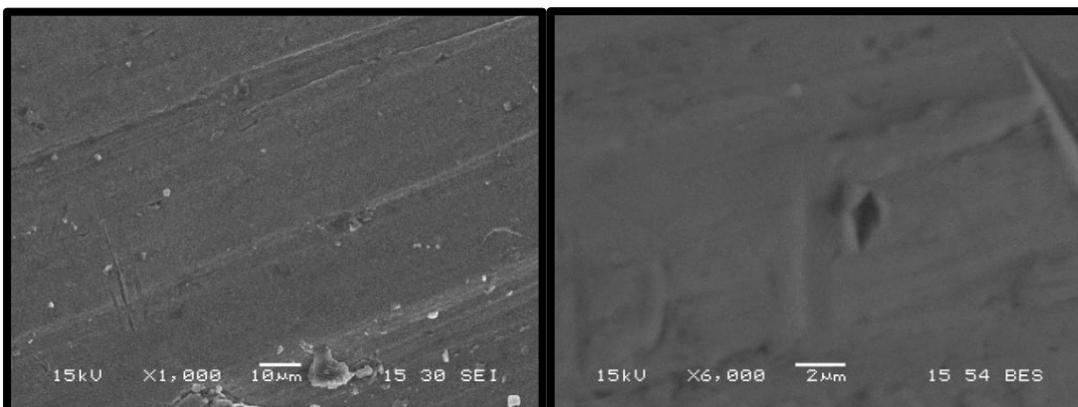


Figura 6.15, Probeta Testigo con aumentos de 1000x y 6000x retrodifundido respectivamente.



En términos generales se puede apreciar que, en las probetas donde se hizo retrodifundido, no se destacan en principio diferencias en cuanto a la composición química de las superficies, notándose una homogeneidad en el contraste.

En todas las probetas se observa gran cantidad de material redepositado a la vez que desperfectos como fisuras y pitting. La mayor cantidad de material redepositado se observa en las probetas, no así en los electrodos.

Se pueden destacar, por su mayor homogeneidad superficial, las probetas B y D; las cuales coinciden en el valor medio de potencia con el cual fueron realizadas. En el resto se pudo apreciar dos zonas diferenciadas, donde una de ellas presentaba mayor cantidad de depósitos que la otra.

6.2.3. Mediciones de rugosidad

De las probetas medidas seleccionamos las probetas A, C y un electrodo para evaluar resultados con los parámetros extremos de potencia. A continuación se muestran gráficos de rugosidad antes y después de realizarles lavado por ultrasonido con el valor Ra promedio de las 3 mediciones realizadas por muestra.

En los gráficos se observa primero la rugosidad medida, segundo la ondulación presente en la superficie y por último la rugosidad con la ondulación filtrada. La distancia entre picos debe ser tomado en cuenta ya que es necesario un tamaño de poro lo suficientemente grande para el tejido óseo crezca hacia dentro del implante (150 μm -500 μm) [Lewallen et al].

- Probeta A

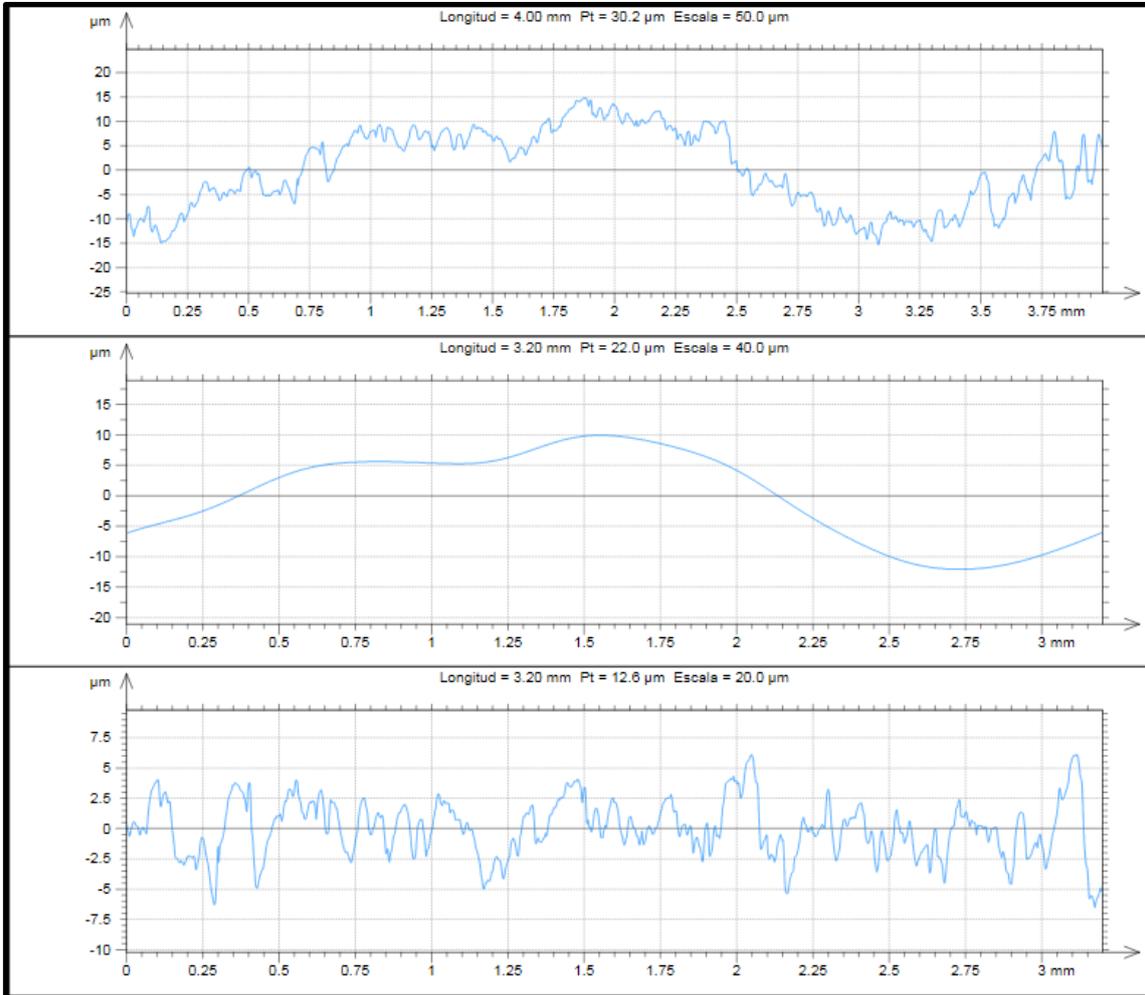


Figura 6.16, Gráfico de rugosidad de muestra A previo a ultrasonido. Ra promedio=1,47 μm

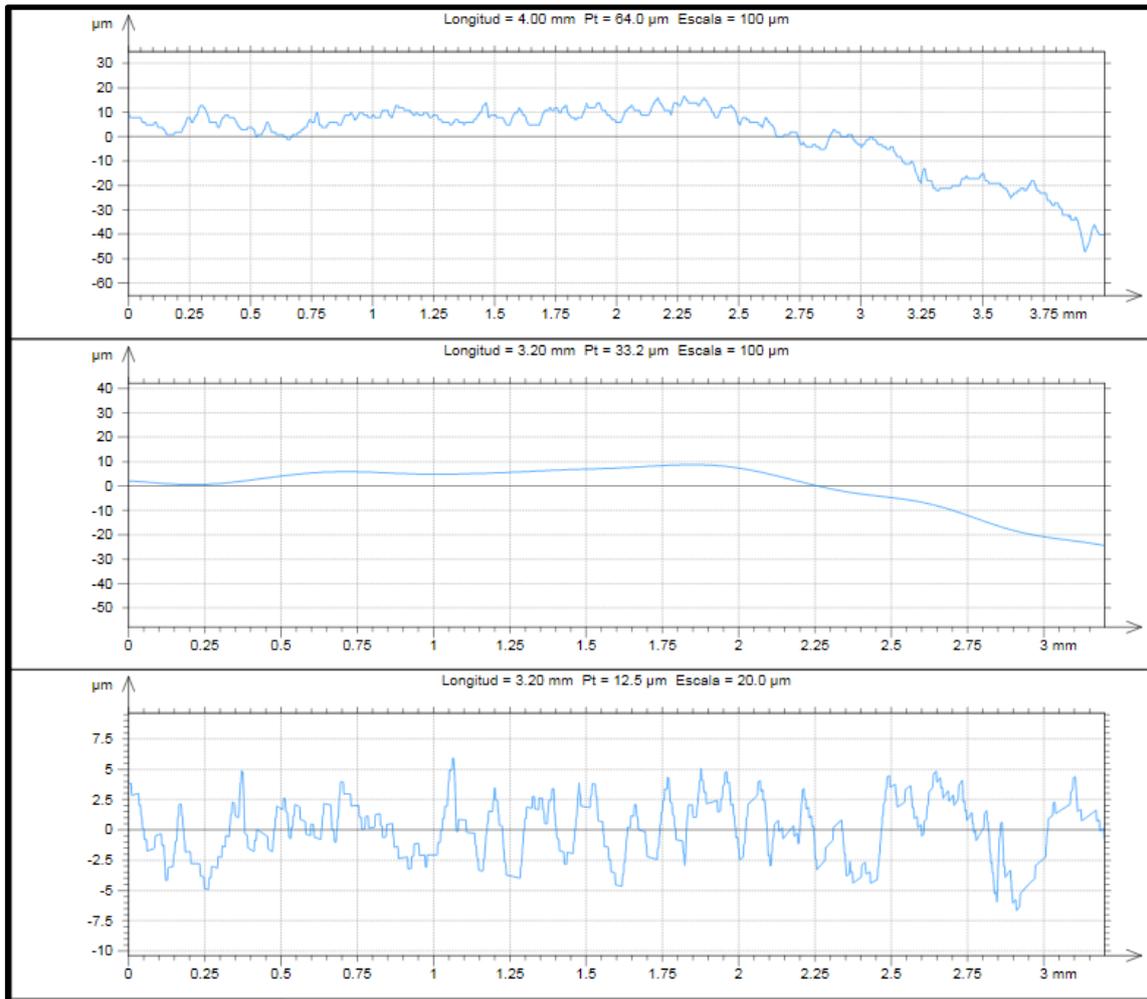


Figura 6.17, Gráfico de rugosidad de muestra A después de ultrasonido. Ra promedio=1,64 μm

- Probeta C

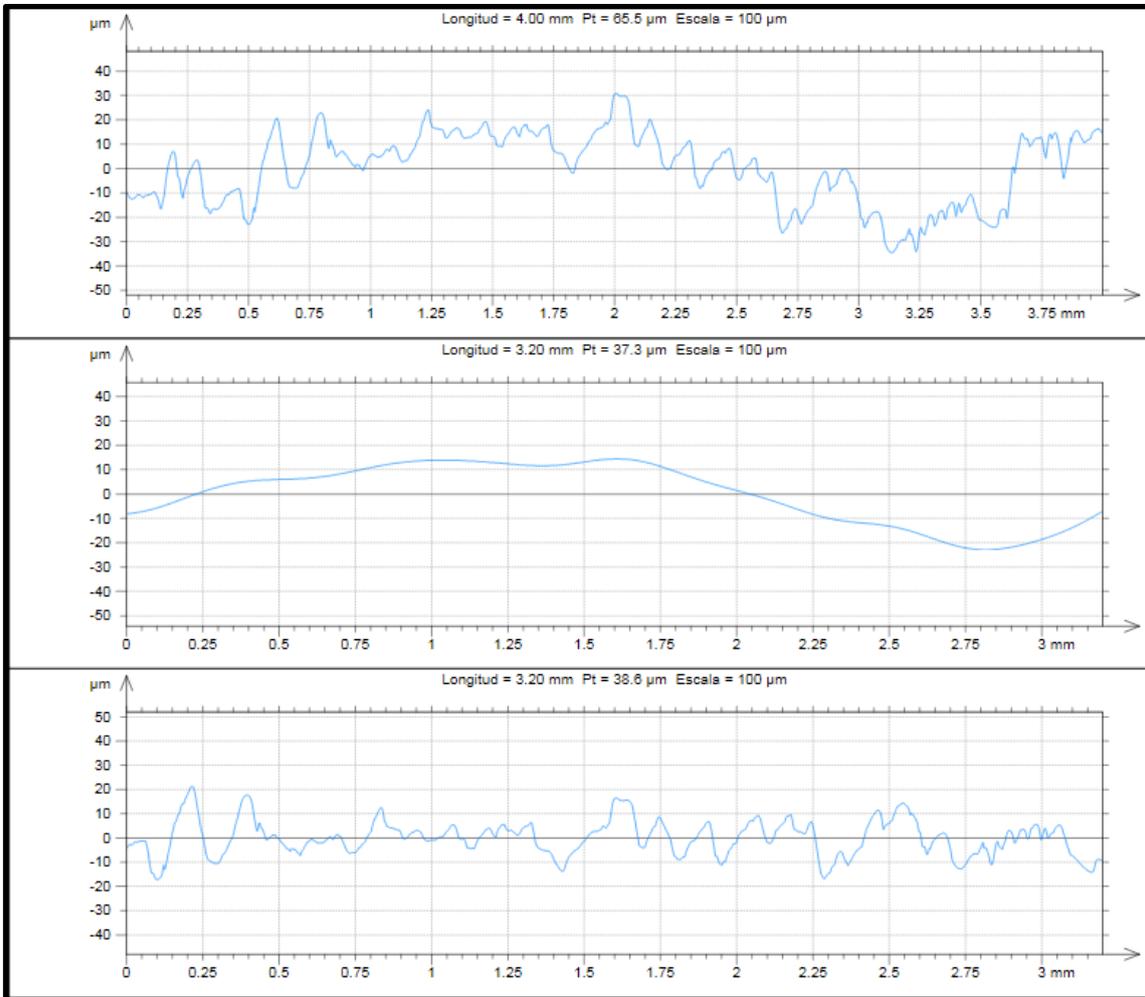


Figura 6.18, Gráfico de rugosidad de muestra C previo a ultrasonido. Ra promedio=4,37 μm

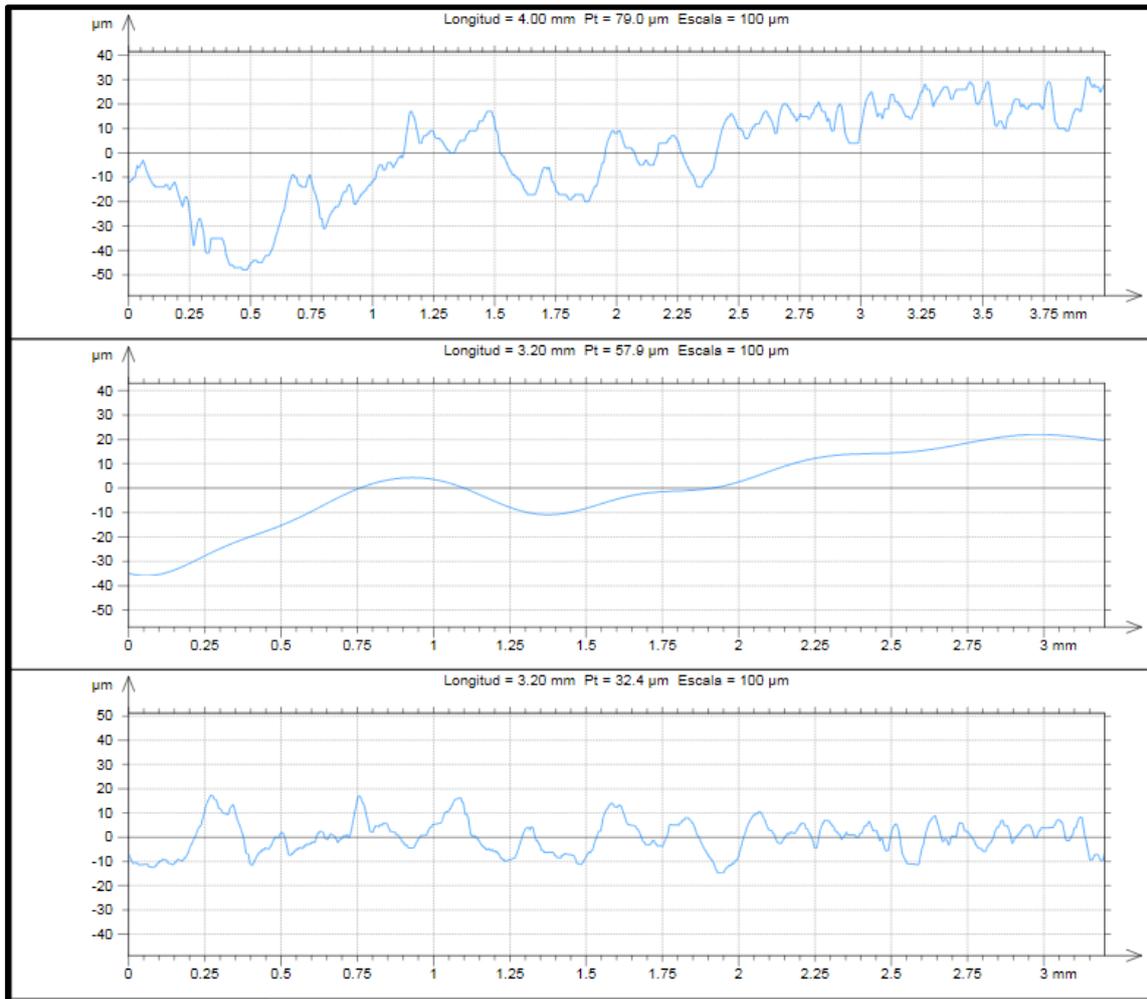


Figura 6.19, Gráfico de rugosidad de muestra C después de ultrasonido. Ra promedio=4,83 μm

- Electrodo

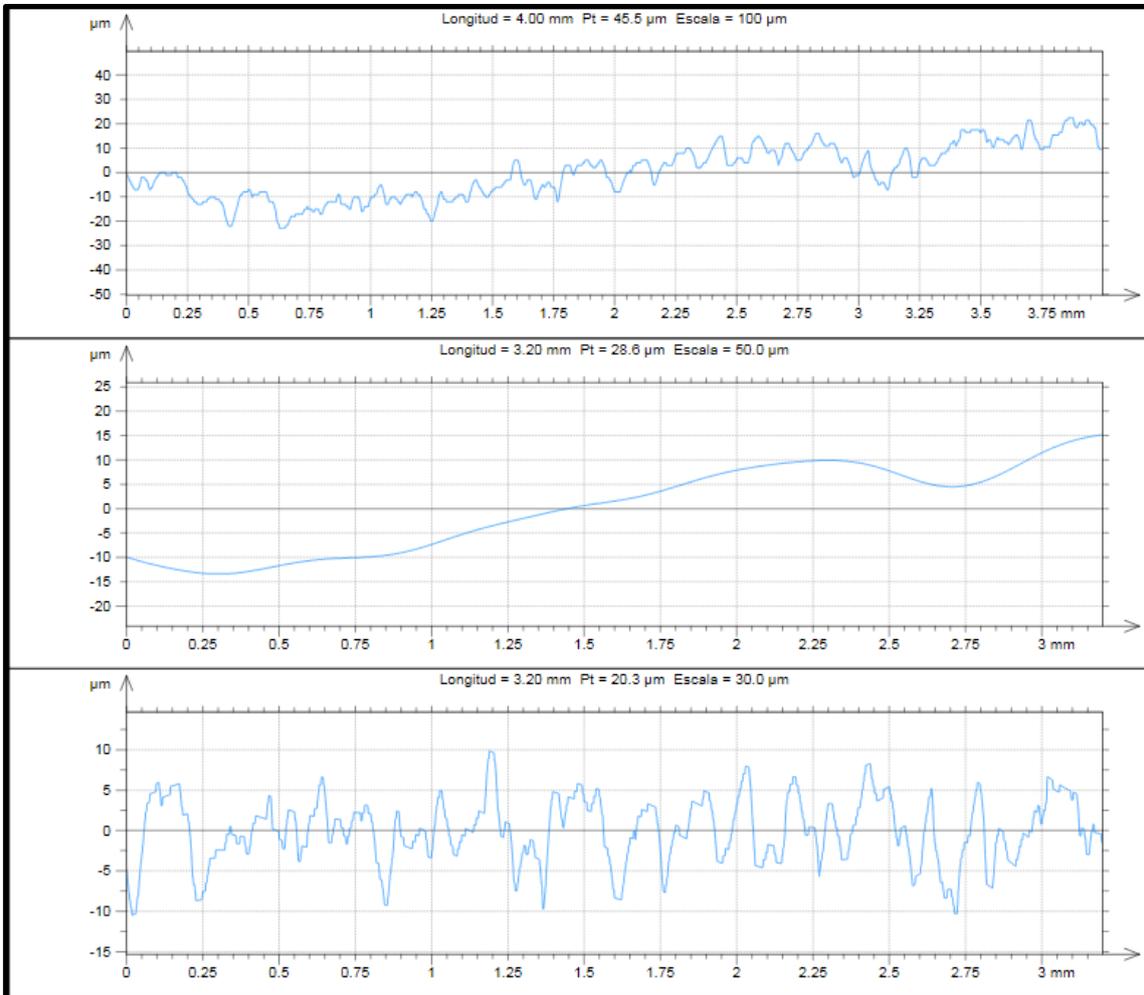


Figura 6.20, Gráfico de rugosidad de Electrodo previo a ultrasonido. Ra promedio=2,83 μm

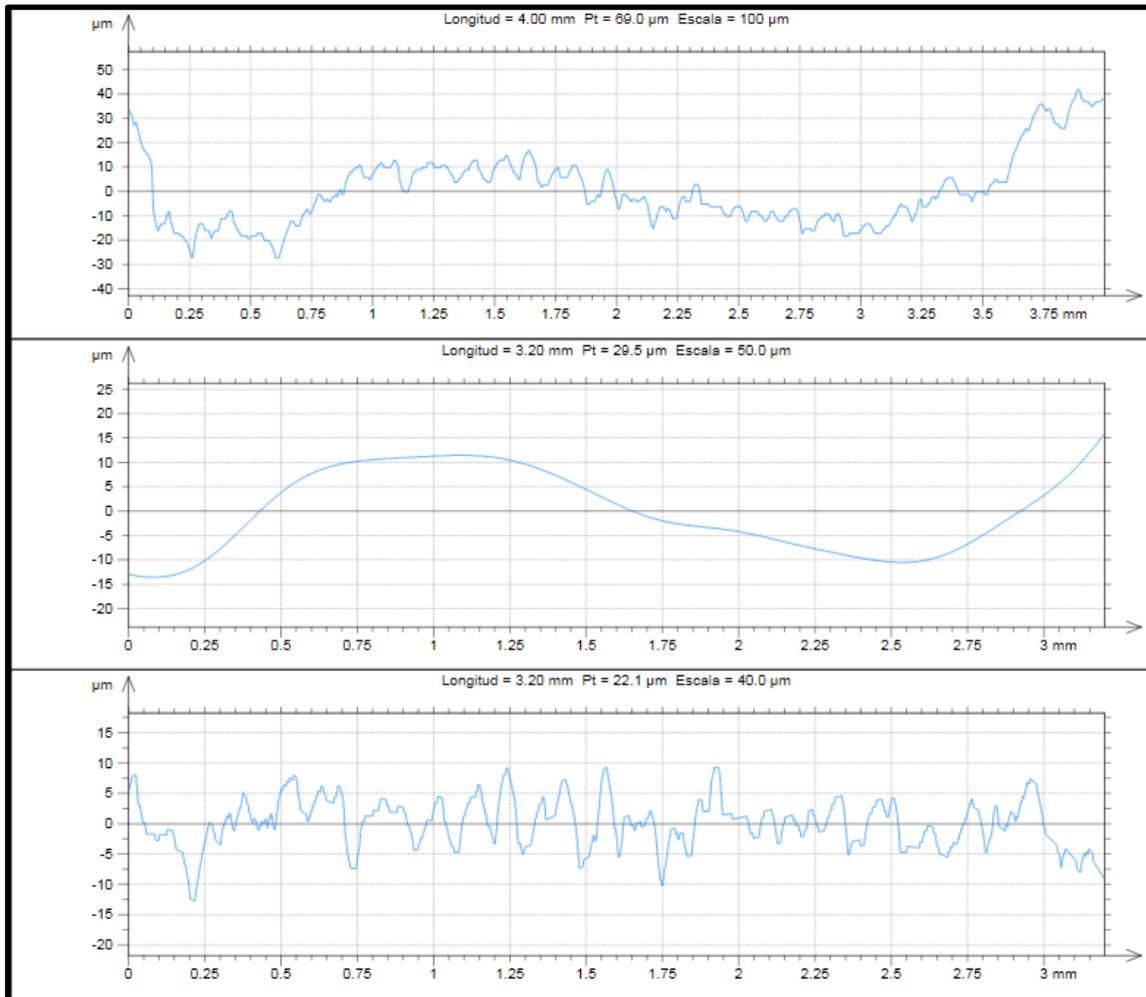


Figura 6.21, Gráfico de rugosidad de Electrodo después de ultrasonido. Ra promedio=2,98 μm

Los valores de rugosidad obtenidos caen dentro del rango que se considera óptimo para que se produzca oseointegración ($0.1 \mu\text{m}$ a $7 \mu\text{m}$). También el tamaño de los poros se encuentran en el rango ($150 \mu\text{m}$ a $500 \mu\text{m}$) indicado para favorecer el crecimiento del tejido óseo en la superficie del implante (principalmente en la probeta C).

Además en los gráficos podemos observar que se produce un aumento de la rugosidad. La magnitud de los cambios coincide con lo observado en las imágenes SEM, la mayor variación se presenta en la probeta C, la cual fue sometida al tratamiento con la potencia más alta y tenía más defectos y material redepositado. La menor variación se observa en el electrodo que, como se había señalado, tenía menor cantidad de material redepositado que las probetas.

6.3. Identificación de compuestos superficiales

Utilizando el software PowderCell hicimos la comparación de nuestros resultados con patrones de difracción de las fases α y β presentes en la aleación de titanio Ti6Al4V. El mismo trae incluido herramientas que permiten hacer la descomposición y refinamiento para poder obtener un resultado aproximado de los porcentajes presentes de cada fase en la superficie del material. Los patrones de difracción de α y β los obtuvimos de una base de datos online de acceso público [Misasa].

En las siguientes imágenes puede verse el análisis de difracción realizado antes y después de electroerosionar:

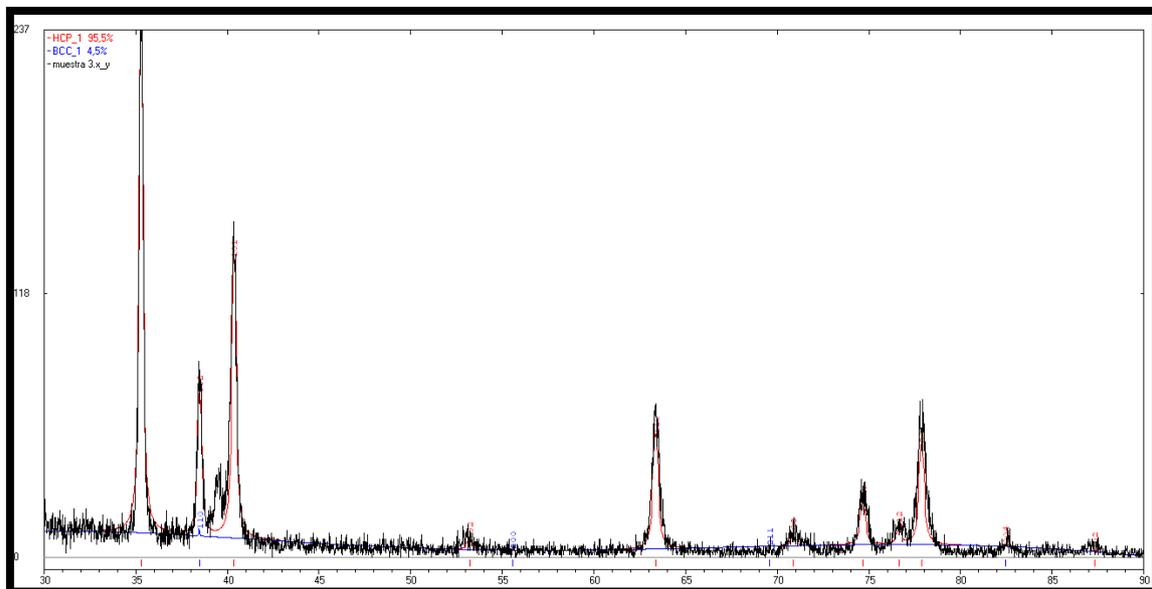


Figura 6.22, Análisis comparativo de difracción, probeta sin erosionar (HCP= 95,5%, BCC=4,5%).

Si comparamos esta composición con el diagrama Ti-6Al-4V (figura 6.23) podemos observar que se encuentra dentro de los valores esperables para material previo a ser tratado.

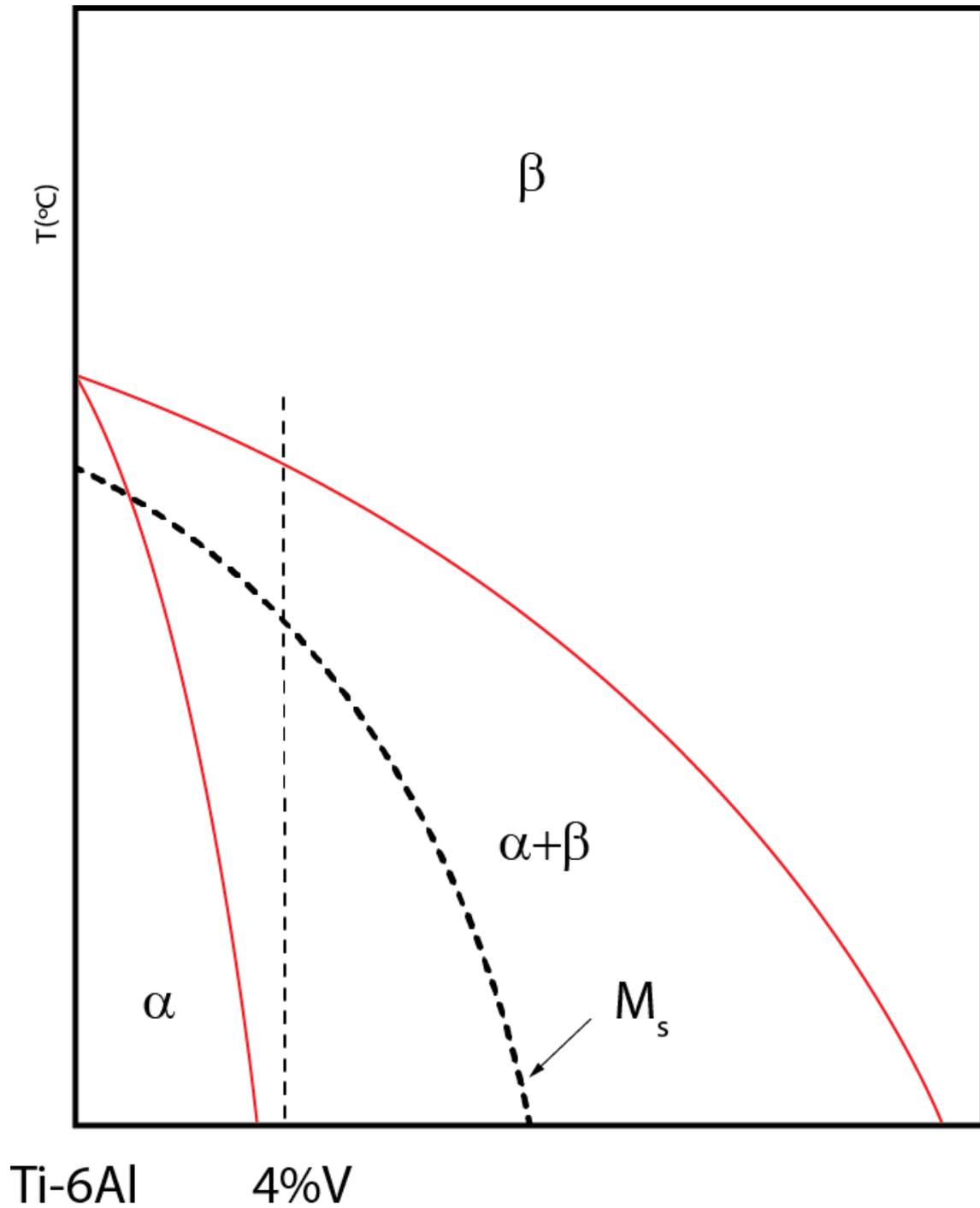


Figura 6.23, Diagrama de Ti-6Al-4V. [Fuente: UCM]



Al observar el patrón de difracción obtenido con la muestra electroerosionada notamos que los picos se habían trasladado hacia la derecha y al realizar el análisis mediante PowderCell solo con los compuestos α y β nos encontramos con que algunos de los picos en la zona central quedaban vacíos por lo que decidimos sumar patrones teóricos de óxidos de titanio (tanto anatasa como rutilo, Fig. 6.24 y 6.25). La estructura atómica de ambos tipos de óxido es HCP (hexagonal).

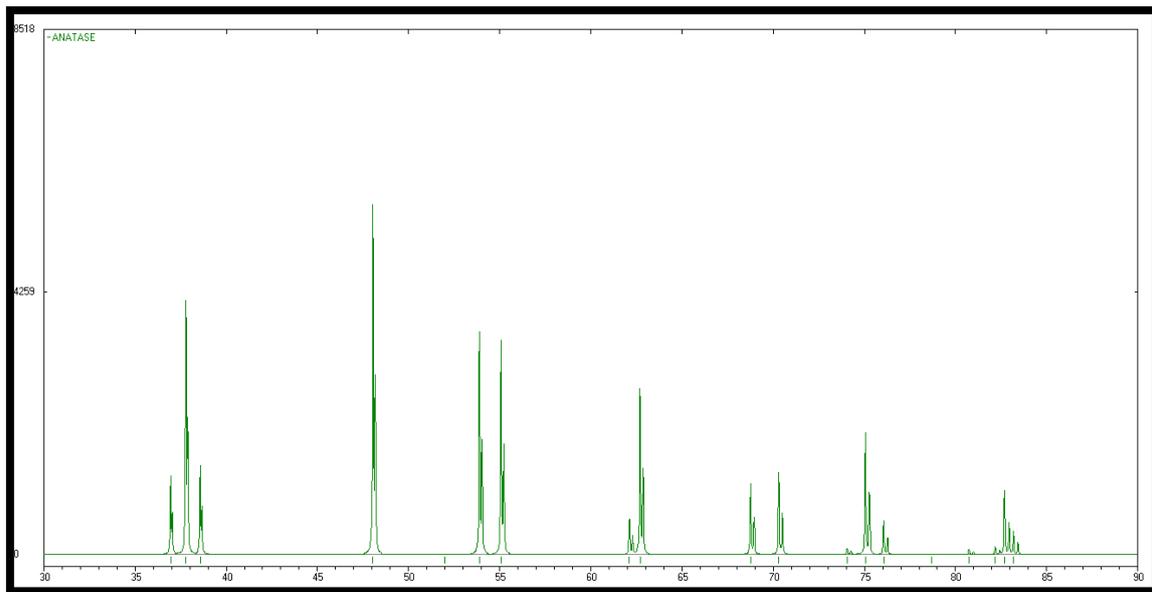


Figura 6.24 Patrón de difracción teórico de óxido anatasa.

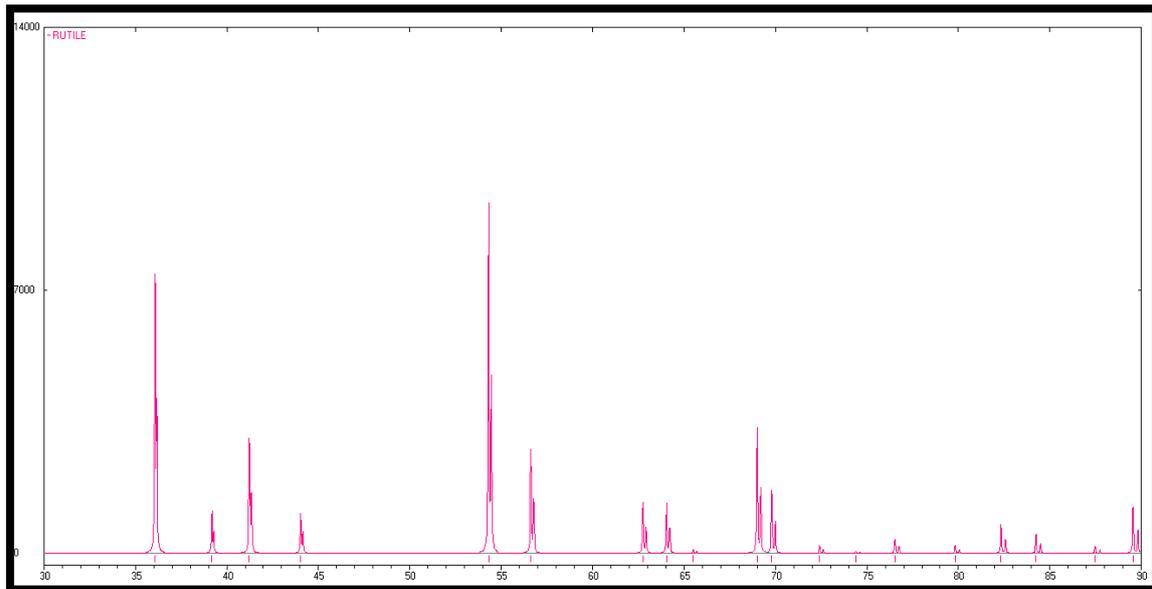


Figura 6.25 Patrón de difracción teórico de óxido rutilico.

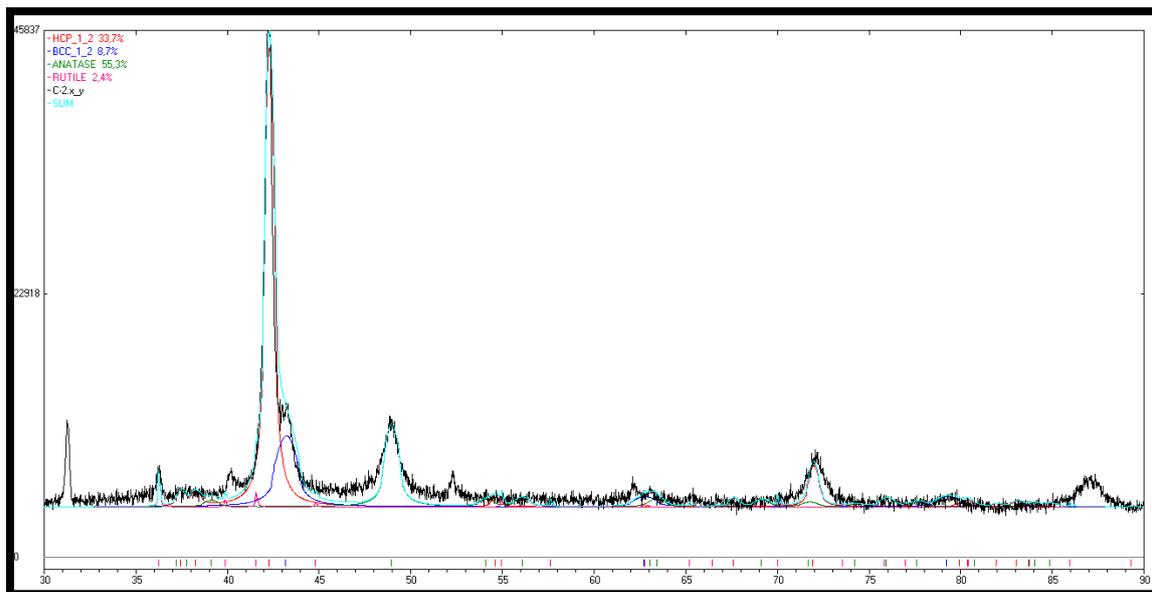


Figura 6.26, Análisis comparativo de difracción en probeta erosionada C2 (HCP= 33,7%, BCC=8,7%, Anatasa= 55,3%, Rutilico= 2,4%).

Lo primero que podemos observar es el gran descenso que se produjo de la fase α para dar lugar a la creación de óxidos (principalmente oxido de tipo anatasa, deseado en la superficie de implantes dentales). Además podemos observar un leve incremento de fase

β (La fase β aumenta cuando su temperatura supera los 800 grados, esto puede derivar en que, al enfriarse, quede fase β retenida que explicaría el aumento de su presencia) en la muestra erosionada y un corrimiento general, hacia la derecha, de los planos de reflexión.

6.4. Análisis Metalográfico

Las imágenes tomadas sobre las muestras, cortadas transversalmente con sierra de hoja de diamante y preparadas en baquelita, mediante microscopio óptico luego de realizar el ataque químico con reactivo Krolls se observan a continuación:

- Imágenes Probeta A

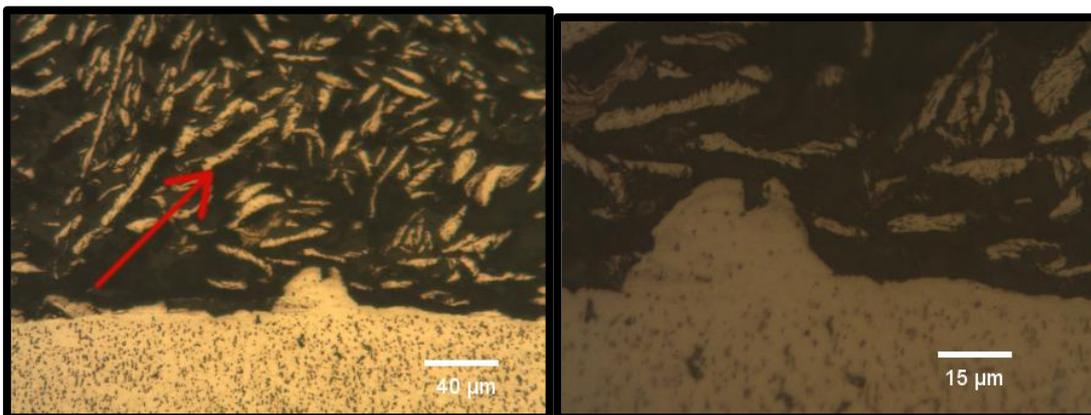


Figura 6.27, Imágenes de muestra A en microscopio óptico a 20x y 50x respectivamente. (Zonas alargadas formadas de fase α)

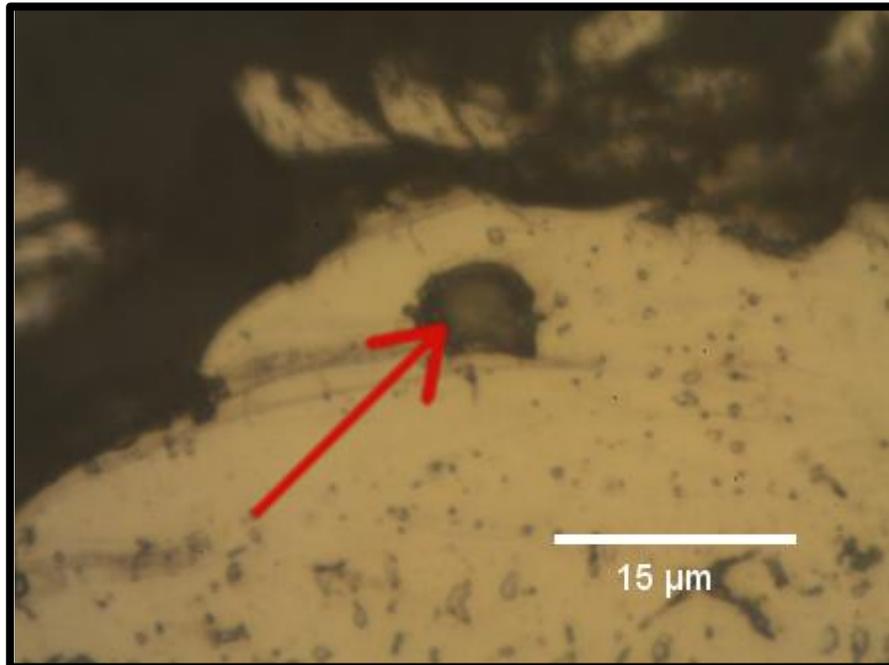


Figura 6.28, Imagen de muestra A con aumento de 100x. (Concentración de fase β)

- Imágenes Probeta C

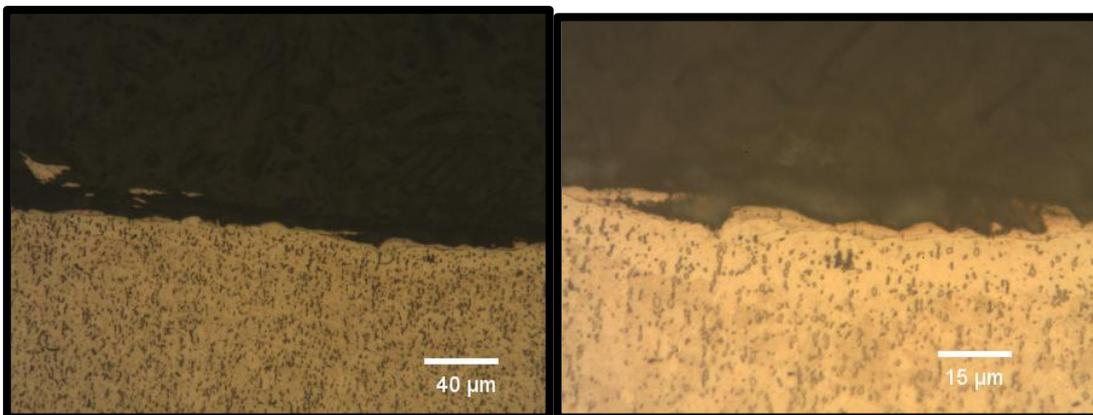


Figura 6.29, Imágenes de muestra C en microscopio óptico a 20x y 50x respectivamente.

- Imágenes Electrodo

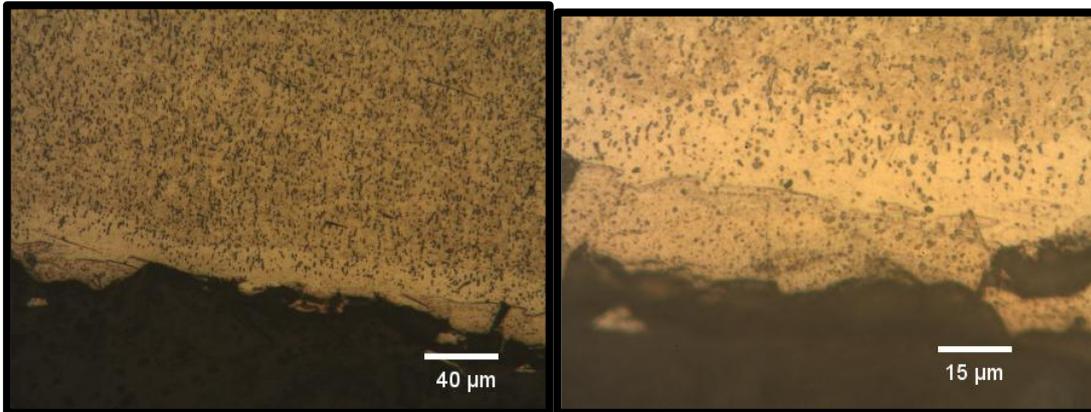


Figura 6.30, Imágenes de Electrodo en microscopio óptico a 20x y 50x respectivamente.

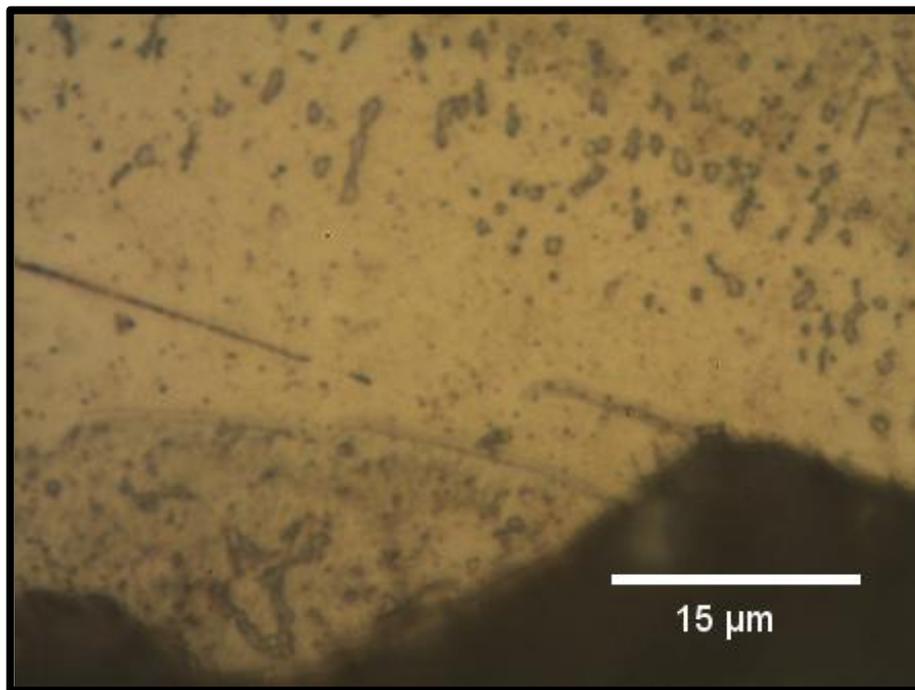


Figura 6.31, Imagen de Electrodo con aumento de 100x.

La tonalidad más clara predominante se trata granos de fase α . Con el ataque empleado no se logran definir los límites de grano α/α . Las imágenes de la probeta A presentaron zonas alargadas formadas de fase α de material desprendido que fue capturado por la



bakelita al realizar la inclusión. Las zonas oscuras que presentan formas de bastones y anulares están compuestas por fase β sin transformar. Puede observarse en las cercanías de la zona afectada por la electroerosión que se producen concentraciones de fase β (Figura 6.28) lo que coincide con el leve aumento de ésta observado mediante DRX. También es posible visualizar fisuras paralelas a la superficie erosionada.

6.5. Medición de dureza

En la siguiente tabla se detallan los resultados en HV obtenidos de las pruebas de dureza sobre las probetas A1 y C3 y el electrodo 1, con una carga aplicada de 50 pondios:

	Dureza [HV]			
	Zona Central		Zona afectada por Electroerosión	
Electrodo 1	549	509	473	509
A1	549	575	509	516
C3	386	362	412	441

Como se ve en la tabla no puede apreciarse una diferencia notable entre la dureza de la zona central de la probeta y la zona afectada por electroerosión.

7. Conclusión

Se logró obtener, de manera consistente, diferentes características superficiales en las probetas tratadas al realizar los ensayos bajo diferentes parámetros de electroerosión. Los resultados observados en las probetas, trabajadas bajo distintas condiciones, son coherentes entre sí y con la bibliografía existente.

Sin embargo, a pesar de haber conseguido una rugosidad dentro del rango aceptable para lograr oseointegración se encontraron defectos en la superficie que no pueden ser aceptados. Las observaciones realizadas en microscopio electrónico demostraron la presencia de defectos tales como fisuras, pitting y material redepositado en forma de láminas muy delgadas, y aunque el número de defectos disminuye a niveles más bajo de corriente, estos no se vieron completamente eliminados.

El análisis realizado mediante difracción de rayos X permitió observar un leve incremento en la cantidad de fase β que se genera al quedar retenida debido al rápido



enfriamiento y una gran generación de óxido de titanio a cambio de un acentuado descenso de la fase α . De los óxidos generados la mayor proporción corresponde al óxido anatasa, que es el tipo de óxido que más se busca generar en la superficie de los implantes para favorecer la oseointegración. En las fotos metalográficas se observó que cerca de la zona erosionada se producen concentraciones de fase β , coincidiendo con el leve incremento visto en el análisis de DRX.

Estas observaciones coinciden con la poca variación en la dureza la cual podemos atribuir, basándonos en estudios previos, al nivel de voltaje utilizado, el cual permaneció constante durante la totalidad de los ensayos (la potencia se regulaba a través de cambios en la intensidad de corriente).

Las variaciones de rugosidad observadas luego de realizar un lavado con ultrasonido indican que el material redepositado no está firmemente adherido y es susceptible a sufrir desprendimientos a un bajo nivel de esfuerzo.

Por lo tanto, ninguno de los grupos de parámetros con los cuales se efectuaron los ensayos alcanza el grado de calidad superficial para ser utilizado en la fabricación de implantes dentales.

8. Trabajos futuros

Existe la posibilidad de realizar nuevos ensayos para intentar obtener mejores resultados. Una posible solución al alto número de defectos superficiales podría ser un cambio en el fluido dieléctrico ya que el rápido enfriamiento que facilita la alta disipación de calor que posee el agua destilada promueve la generación de grietas en la superficie. En cuanto a la presencia de material redepositado podría verse disminuido al usarse una bomba que recircule el fluido dieléctrico de forma más intensa o utilizar una electroerosionadora que permita variar otros parámetros. De no poder reducir completamente la presencia de material redepositado debería realizarse siempre un lavado por ultrasonido.

Para evaluar de manera más precisa la composición superficial proponemos realizar un estudio de espectroscopia Raman, y así verificar los valores de óxido anatasa presentes en la superficie electroerosionada. Además evaluar el posible nivel de corrosión de las probetas tratadas mediante electroerosión usando saliva artificial. Esto serviría para determinar la integridad de la capa superficial de óxido y la severidad de los defectos superficiales.



También se podrían realizar ensayos a voltajes más altos con el fin de obtener diferentes características mecánicas para evaluar posibles mejoras en la superficie, dejando fija la intensidad de corriente que mejor calidad superficial produce dentro del rango de rugosidad aceptado.



9. Bibliografía

- Affatato, S. Goldoni, M. Testoni, M. Toni, A. // *Mixed oxides prosthetic ceramic ball heads. Part 3: effect of the ZrO₂ fraction on the wear of ceramic on ceramic hip joint prostheses. A longterm in vitro wear study. Biomaterials*, 2001.
- Albrektsson T., Branemark P-I., Hansson H-A. and Lindstrom J. // *Acta Orthop. Scand* 52, 1981.
- Aparicio Bádenas, Conrado // *Tratamientos de superficie sobre titanio comercialmente puro para la mejora de la osteointegración de los implantes dentales*, 2005.
- Aspinwall D.K., Soo S.L., Berrisford A.E. and Walder G. // *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 57 (2008) 187.
- Bruce Burlington, D. // *Steam Re-Sterilization Causes Deterioration of Zirconia Ceramic Heads of Total Hip Prostheses*. 1997.
- Camprubí Graell A. // *Electroerosión, fundamentos de su física y su técnica*, 2007.
- Coppa A, Bondioli L, Cucina A, Frayer DW, Macchiarelli R. // *Early Neolithic tradition of dentistry*, 2006.
- Crubzy E, Murail P, Girard L, Bernadou JP. // *False teeth of the Roman world*, 1998.
- Diwanji, S.R., Seon J.K., Song E.K., Yoon T.R. // *Fracture of the ABC (R) ceramic liner - A report of three cases. Clinical Orthopaedics and Related Research*, 2007.
- Dr. Manger // <https://web.archive.org/web/20070713022408/http://www.drmanager.com/implants/history.html>
- Ekmekci B., Elkoca O., Erman Tekkaya A. and Erden A. // *Machining Science and Technology* 9, (2005) 39.
- Ellis, R.H. y J. Mulvein, // *Cardiovascular effects of methylmethacrylate. Journal of Bone and Joint Surgery-British Volume*, 1974.
- Gadelmawla E.S., Koura M.M., Maksoud T.M.A., Elewa I.M. and Soliman H.H. // *Journal of Materials Processing Technology* 123, (2002) 133.
- Gerd Lütjering, James C. Williams. // *Titanium*, 2003.
- Gu L., Li L., Zhao W. and Rajurkar K. P. // *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 53 (2012) 100.
- Guercio E., Dinatale E. // *Consideraciones estructurales y biológicas en la*



oseointegración - Revisión de la literatura, 2008.

- Haskalik A. and Caydas U. // *Journal Of Materials Processing Technology* 190 (2007) 173.
- Kao J.Y., Tsao C.C., Wang S. S. and Hsu C.Y. // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 47, (2010) 395.
- Lewallen E.A., Riester S.M., Bonin C.A., Kremers Hilal M., Dudakovic A, Kakar S, Cohen R.C., Westendorf J.J., Lewallen D.G., van Wijnen A.J. // *Biological strategies for improved osseointegration and osteoinduction of porous metal orthopedic implants*, (2015).
- Lin Y.C., Yan B.H. and Chang Y.S. // *Journal of Materials Processing Tech.* 104 (2000)171.
- Lütjering G., // 'Influence of Processing on Microstructure and Mechanical Properties of ($\alpha+\beta$) Titanium Alloys', *Materials Science and Engineering*, A243, (1998) 32-45.
- Mendonça G, Mendonça D.B.S, Aragao F.J.L, Cooper L.F. // *Advancing dental implant surface technology – From micron – to nanotopography*. 2008.
- Misasa // <http://www.misasa.okayama-u.ac.jp/~masami/xrd.html>
- Portales Médicos // <https://www.portalesmedicos.com/publicaciones/articulos/696/1/Resena-historica-de-la-Implantologia-dental.html>
- Salou L, Hoornaert A, Louarn G and Layrolle P // *Enhanced osseointegration of titanium implants with nanostructured surfaces: An experimental study in rabbits*. (2015)
- San Roman F, Llorens M.P, Lloret P.P. // *Atlas de Odontología en Pequeños Animales*. 1998
- Schuckert K-H, Jopp S and Muller U. // *Hueso nuevo crecido sobre superficies expuestas de implantes usando terapia fotodinámica y rhBMP-2: Informe de un caso*. 2006.
- Stasky P., Janecek J., Harcuba M., Bukovina M. and Wagner L. // *Journal of the mechanical behaviour of biomedical materials* 4 (2011) 1955.
- Universidad Complutense de Madrid // <https://www.ucm.es/atlasmetalografico/diagrama-ti6al4v>
- Williams D.F. // *On the mechanisms of biocompatibility*, 2008.