

ESTANDARIZACIÓN DEL PROCESO DE ELECTROPULIDO EN PLANTA DE
DISPOSITIVOS PARA TRAUMA ÓSEO DE ACERO 316 LVM, FABRICADOS
POR LA EMPRESA QUIRÚRGICOS ESPECIALIZADOS S. A.

LEIDY KATHERINE SÁNCHEZ TORRES

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES

BUCARAMANGA

2015

ESTANDARIZACIÓN DEL PROCESO DE ELECTROPULIDO EN PLANTA DE
DISPOSITIVOS PARA TRAUMA ÓSEO DE ACERO 316 LVM, FABRICADOS
POR LA EMPRESA QUIRÚRGICOS ESPECIALIZADOS S. A.

LEIDY KATHERINE SÁNCHEZ TORRES

Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniera Metalúrgica

Director

DARÍO YESID PEÑA BALLESTEROS

PhD. M. Sc. Ingeniero Metalúrgico

Codirector

NERLY DEYANIRA MONTAÑEZ SUPELANO

M. Sc. Ingeniera Química

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES

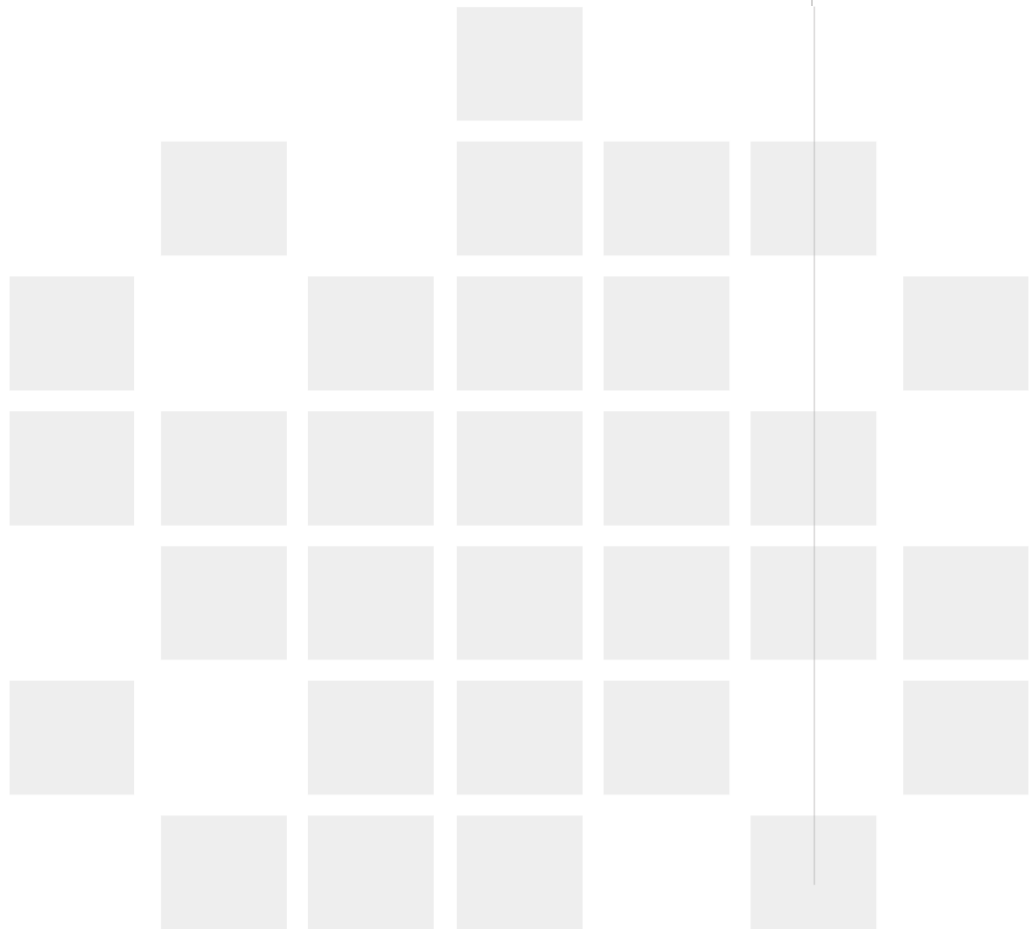
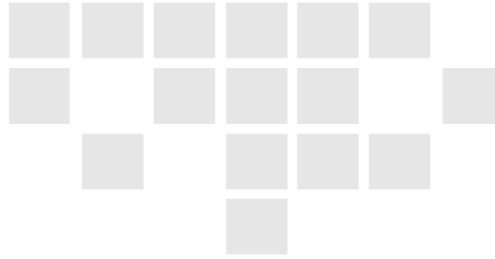
BUCARAMANGA

2015

Dedicatoria



Dedico este trabajo de grado a Dios, por darme la oportunidad de vivir y hacer este logro posible, también a mis familiares, novio, empleadores, profesores, técnicos de los laboratorios, tutores, compañeros laborales y amigos; que de alguna u otra manera contribuyeron y estuvieron presentes en mi proceso de formación.



Agradecimiento

Agradezco a la Universidad Industrial de Santander (UIS) por brindarme las herramientas necesarias para emprender proyectos y labores en el área de la industria metalúrgica y de los materiales, a través de la formación integral recibida en la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.

A mi Director de proyecto, el PhD. Darío Peña, a todos mis profesores de pregrado y a todos los técnicos de los laboratorios.

A la empresa Quirúrgicos Especializados S. A. A su directivo; el Dr. Gabriel Jaimes por la oportunidad, al Ing. Pablo Ávila y operarios.

A mi codirectora de proyecto, la M. Sc. Nerly Montañez por su orientación y buena gestión.

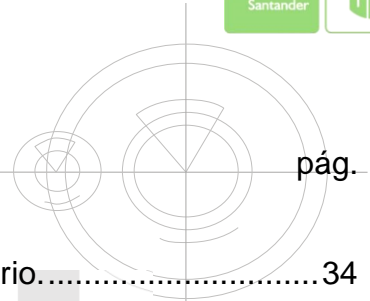
Al Grupo de Investigación en Corrosión (GIC) sede Guatiguará y a los auxiliares del laboratorio.

A Colciencias por integrar este proyecto al proyecto titulado ESTRATEGIA DE GESTIÓN DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INVESTIGACIÓN HACIA LA CONSOLIDACIÓN DE NUEVOS PRODUCTOS BIOMÉDICOS DE LA EMPRESA QUIRÚRGICOS ESPECIALIZADOS S. A.



CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	15
1. OBJETIVOS	16
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	16
2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	17
3. JUSTIFICACIÓN.....	18
4. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA	19
4.1. INFORMACIÓN GENERAL DE LA EMPRESA	19
4.2. RESEÑA HISTÓRICA DE LA EMPRESA	19
4.3. PRODUCTOS FABRICADOS POR LA EMPRESA.....	20
5. ESTADO DEL ARTE.....	21
6. MARCO TEÓRICO	24
6.1. ELECTROPULIDO DE ACERO INOXIDABLE 316 LVM.....	24
7. DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL	27
7.1. DISEÑO DE EXPERIMENTOS FACTORIAL FRACCIONADO	27
7.2. MATERIALES PARA ELECTROPULIR	27
7.3. PROCESO DE ELECTROPULIDO	29
7.3.1. Materiales y equipos usados en electropulido.....	29
7.3.2. Reactivos usados en electropulido.....	32
7.3.3. Definición de las variables de electropulido	34



7.3.3.1. Primera etapa de electropulido a nivel de laboratorio.....	34
7.3.3.2. Segunda etapa de electropulido a nivel aplicación planta piloto.....	36
7.4. METODOLOGÍA DE ELECTROPULIDO ESTANDARIZADO	36
7.5. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN.....	38
8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
8.1. PRIMERA ETAPA DE ELECTROPULIDO A NIVEL DE LABORATORIO.	39
8.2. SEGUNDA ETAPA DE ELECTROPULIDO A NIVEL APLICACIÓN PLANTA PILOTO.....	42
8.3. AFM.....	43
8.4. SEM.....	44
8.5. MICRODUREZA	46
9. CONCLUSIONES	49
CITAS BIBLIOGRÁFICAS	50
BIBLIOGRAFÍA.....	52
ANEXOS	56

LISTA DE TABLAS



	pág.
Tabla 1. Información general de la empresa Quirúrgicos Especializados S. A.....	19
Tabla 2. Productos fabricados por la empresa Quirúrgicos Especializados S. A...	20
Tabla 3. Reacciones involucradas en el proceso de electropulido de acero inoxidable 316 LVM.	26
Tabla 4. Diseño de experimentos factorial fraccionado.....	27
Tabla 5. Dispositivos para trauma óseo de acero inoxidable 316 LVM usados en el proceso de electropulido.....	28
Tabla 6. Concentración de los constituyentes para cada electrolito.	33
Tabla 7. Concentración y relación en volumen de mezcla de los constituyentes del electrolito.	33
Tabla 8. Cantidad de los constituyentes para cada electrolito, según la concentración de ácido ortofosfórico.	33
Tabla 9. Variables del proceso de electropulido.....	34
Tabla 10. Variables modificadas del proceso de electropulido.....	35
Tabla 11. Variables estandarizadas del proceso de electropulido.....	36
Tabla 12. Microdureza de las probetas cilíndricas de acero 316 LVM electropulidas con electrolitos de concentración 65 %v/v H ₃ PO ₄ , 86 %v/v H ₃ PO ₄ y 45 %v/v H ₃ PO ₄	47
Tabla 13. Microdureza de las placas DCP de acero 316 LVM en estado de mecanizado, pulida mecánicamente y electropulida.	48

LISTA DE FIGURAS



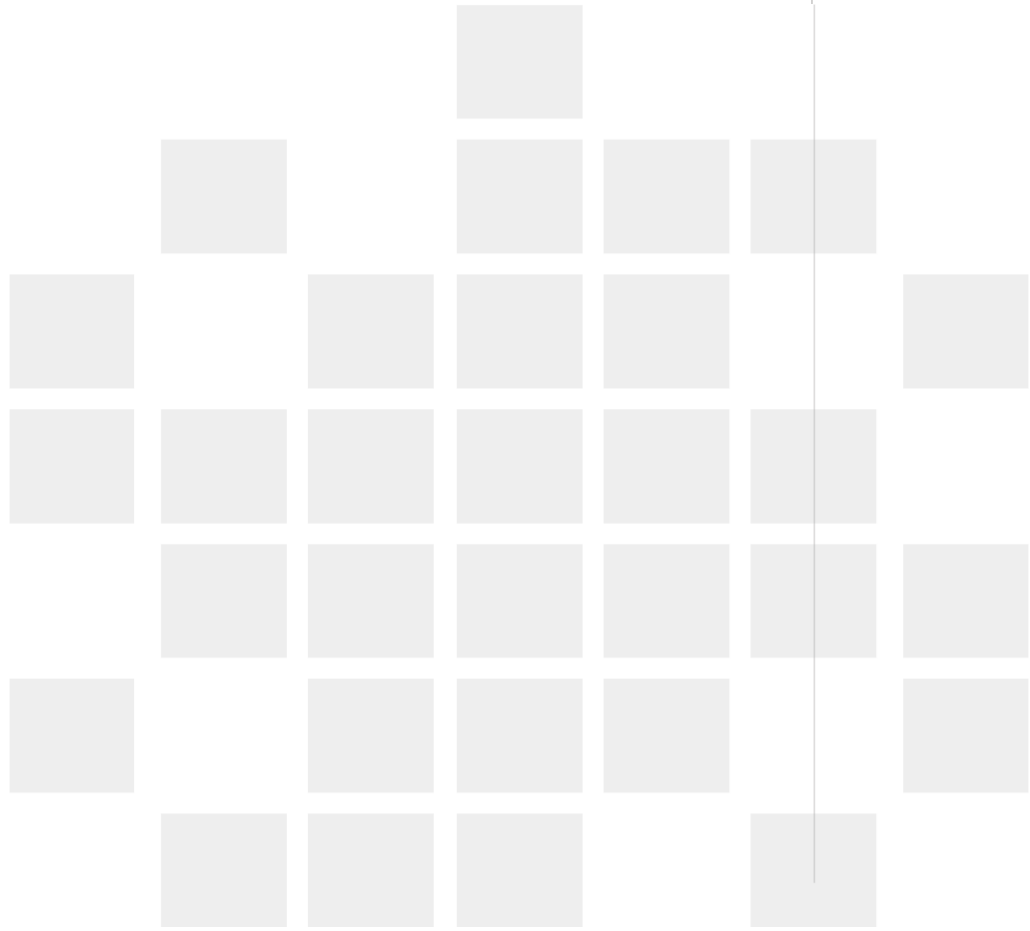
	pág.
Figura 1. Representación transversal de la superficie sometida a electropulido. ...	24
Figura 2. Curva de densidad de corriente en función del voltaje.	25
Figura 3. Probeta cilíndrica de acero inoxidable 316 LVM.	28
Figura 4. Montaje de la celda de electropulido a nivel de laboratorio, en las instalaciones del Grupo de Investigación en Corrosión (GIC).	30
Figura 5. Montaje de la celda de electropulido a nivel aplicación planta piloto, en las instalaciones de la empresa Quirúrgicos Especializados S. A. a) para tornillos corticales y esponjosos y b) para placas DCP.	30
Figura 6. Metodología del proceso de electropulido estandarizado.	37
Figura 7. Tornillos corticales de acero inoxidable 316 LVM del ensayo 9 del Anexo B.	39
Figura 8. Probeta cilíndrica de acero inoxidable 316 LVM del ensayo 8 del Anexo C.	40
Figura 9. a) Diagrama de Pareto estandarizado para rugosidad, b) gráfico de efectos principales para rugosidad, c) gráfico de interacción para rugosidad y d) gráfico de probabilidad normal para rugosidad.	41
Figura 10. Tornillo esponjoso de acero inoxidable 316 LVM electropulido con las variables estandarizadas.	42
Figura 11. Placas DCP de acero inoxidable 316 LVM electropulida con las variables estandarizadas y no electropulida.	43
Figura 12. Rugosidad por AFM en formato HDF, representada en un gráfico de área con el visualizador MATLAB, de la superficie de las placas DCP de acero 316 LVM a) pulida mecánicamente, b) en estado de mecanizado y c) electropulida con las variables estandarizadas.	44



Figura 13. Espectroscopías por SEM de los elementos químicos, presentes en la superficie de las probetas cilíndricas de acero 316 LVM electropulidas con electrolitos de concentración a) 65 %v/v H₃PO₄, b) 86 %v/v H₃PO₄ y c) 45 %v/v H₃PO₄. 45

Figura 14. Micrografías electrónicas por SEM tomadas a 5000 X, de la superficie de las probetas cilíndricas de acero 316 LVM electropulidas con electrolitos de concentración a) 65 %v/v H₃PO₄, b) 86 %v/v H₃PO₄ y c) 45 %v/v H₃PO₄. 46

Figura 15. Microdureza Vickers de las probetas cilíndricas de acero 316 LVM electropulidas con electrolitos de concentración a) 65 %v/v H₃PO₄, b) 86 %v/v H₃PO₄ y c) 45 %v/v H₃PO₄. 47



LISTA DE ANEXOS



pág.

Anexo A. Algunos materiales y equipos utilizados en el laboratorio del Grupo de Investigación en Corrosión (GIC) y en la planta de la empresa Quirúrgicos Especializados S. A.	56
Anexo B. Tornillos corticales de acero inoxidable 316 LVM electropulidos, con las variables del proceso de electropulido de la Tabla 9.....	57
Anexo C. Probetas cilíndricas de acero inoxidable 316 LVM electropulidas, con las variables modificadas del proceso de electropulido de la Tabla 10.....	58

RESUMEN

TÍTULO: ESTANDARIZACIÓN DEL PROCESO DE ELECTROPULIDO EN PLANTA DE DISPOSITIVOS PARA TRAUMA ÓSEO DE ACERO 316 LVM, FABRICADOS POR LA EMPRESA QUIRÚRGICOS ESPECIALIZADOS S. A. *

AUTOR: Leidy Katherine Sánchez Torres. **

PALABRAS CLAVES: Acero 316 LVM, celda, dispositivos para trauma óseo, electrolito, microdureza y rugosidad.

CONTENIDO: La empresa Quirúrgicos Especializados S. A. se dedica a la fabricación y distribución de material de osteosíntesis y reemplazos articulares; consolidando bienestar mediante procesos y procedimientos que al momento de su instalación en Bucaramanga en el 2009, siguieron los parámetros de las normas ISO 9000: 2008 e ISO 13485: 2003, mediante su experto equipo en materiales y experiencia en diseño y desarrollo de dispositivos médicos QUIRUTEK. En su ámbito investigativo mantiene convenios con la Universidad Industrial de Santander (UIS), el Grupo de Investigación en Corrosión (GIC) y Colciencias, que en conjunto apoyan el desarrollo de prácticas empresariales investigativas en biomédica.

El proyecto ESTANDARIZACIÓN DEL PROCESO DE ELECTROPULIDO EN PLANTA DE DISPOSITIVOS PARA TRAUMA ÓSEO DE ACERO 316 LVM, FABRICADOS POR LA EMPRESA QUIRÚRGICOS ESPECIALIZADOS S. A. se realizó bajo el marco del proyecto ESTRATEGIA DE GESTIÓN DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INVESTIGACIÓN HACIA LA CONSOLIDACIÓN DE NUEVOS PRODUCTOS BIOMÉDICOS DE LA EMPRESA QUIRÚRGICOS ESPECIALIZADOS S. A. en fase experimental a escala de laboratorio y primer etapa a escala planta piloto.

El proyecto finalizó dentro del presupuesto, fuera del cronograma, dentro del alcance en cuanto a protocolo, dimensiones y microdureza de los dispositivos, superficie homogénea y sin porosidad, y fuera del alcance en cuanto a brillo deseado por los stakeholders. Se efectuaron pruebas de microdureza con el equipo Zwick/ Roell (Indentec), de rugosidad con el microscopio de fuerza atómica (AFM) y de análisis superficial con el microscopio electrónico de barrido (SEM).

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director PhD. M. Sc. Ing. Darío Y. Peña B. Codirector M. Sc. Ing. Nerly D. Montañez S.

ABSTRACT

TITLE: ELECTROPOLISHING PROCESS ESTANDARDIZATION IN PLANT OF LVM 316 STEEL DEVICES FOR BONE TRAUMA, MANUFACTURED BY S. A. ESPECIALIZED SURGICAL COMPANY. *

AUTHOR: Leidy Katherine Sánchez Torres. **

KEYWORDS: Cell, devices for bone trauma, electrolyte, LVM 316 steel, microhardness and roughness.

CONTENT: S. A. Especialized Surgical Company is dedicated to manufacture and distribution of bony synthesis material and articular replacements. It has been consolidating welfare through processes and procedures that at the moment of its installation in Bucaramanga in 2009 they followed the ISO 9000: 2008 and ISO 13485: 2003 standards parameters through its expert team in materials and its experience in design and development of QUIRUTEK medical devices. In its investigative scope it maintain agreements with the (SIU) Santander Industrial University, the (CIG) Corrosion Investigation Group and Colsciences, that together, they support the development of biomedical investigative management practices.

ELECTROPOLISHING PROCESS ESTANDARDIZATION IN PLANT OF LVM 316 STEEL DEVICES FOR BONE TRAUMA, MANUFACTURED BY S. A. ESPECIALIZED SURGICAL COMPANY project is realized under the SCIENCE, TECHNOLOGY AND INVESTIGATION MANAGEMENT STRATEGY TOWARDS THE CONSOLIDATION OF NEW BIOMEDICAL PRODUCTS OF THE S. A. ESPECIALIZED SURGICAL COMPANY project standard in experimental stage to laboratory scale and first stage to pilot plant scale.

Project finished inside estimate, away chronogram, inside scope in protocol, dimensions and microhardness of the devices, homogeneous surface and without porosity and away scope in desired shine for the stakeholders. Microhardness test was realized with Zwick/ Roell (Indentec) equipment, roughness test was realized with (AFM) atomic force microscope and superficial analysis test was realized with (SEM) sweeping electronic microscope.

* Degree project

** Physicochemical Engineerings Faculty. Metallurgical Engineering and Materials Science School. Director PhD. M. Sc. Eng. Darío Y. Peña B. Co-director M. Sc. Eng. Nerly D. Montañez S.

INTRODUCCIÓN

Uno de los biomateriales más empleados es el acero 316 LVM por su excelente resistencia a la corrosión general, intergranular, por picaduras y en hendiduras en medio fisiológico. Con este biomaterial se fabrican implantes temporales como clavo fémur, placa DCP, otras placas de osteosíntesis, tornillos y fijadores; en los que resulta importante evitar fallas como deformación permanente, fractura por sobrecarga y fractura por fatiga, de modo que, a nivel comercial se tiene en cuenta el aspecto superficial que se encargará de proteger la parte interna de los implantes.

Para la empresa Quirúrgicos Especializados S. A. es importante usar electropulido para algunos de sus implantes de acero 316 LVM porque quiere mejorar las propiedades metalúrgicas de sus productos y disminuir tiempos de operación.

Se realizó el electropulido de tornillos corticales, tornillos esponjosos y placas DCP de acero 316 LVM en estado de mecanizado sin previo pulido mecánico. A escala de laboratorio, se sometieron las probetas y tornillos a los tres electrolitos planeados con diferentes concentraciones de ácido ortofosfórico, ácido sulfúrico, ácido crómico y agua; bajo las condiciones de densidad de corriente y tiempo de electropulido planeadas e implícitas en el diseño de experimentos, y a escala primera fase planta piloto, se sometieron las placas DCP bajo las condiciones de electropulido estandarizadas y obtenidas a escala de laboratorio, pero se realizaron modificaciones en el mecanismo de sujeción o rack y en las dimensiones de la celda.

Las métricas de calidad de los dispositivos electropulidos, fueron los resultados de microdureza obtenidos con el equipo Zwick/ Roell (Indentec), de rugosidad con el microscopio de fuerza atómica (AFM), de análisis superficial con el microscopio electrónico de barrido (SEM) y de brillo con la inspección visual de los expertos.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Estandarizar el proceso de electropulido de dispositivos para trauma óseo de acero 316 LVM fabricados por la empresa Quirúrgicos Especializados S. A.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1.2.1. Obtener el electropulido de implantes en acero 316 LVM libre de porosidad, homogéneo, brillante y con un rango dimensional óptimo.

1.2.2. Establecer las variables del proceso y evaluar el efecto de cada una respecto al resultado.

1.2.3. Plantear, desarrollar y aplicar la metodología del proceso de electropulido estandarizado.

1.2.4. Desarrollar un protocolo del proceso de electropulido para que sea implementado por la empresa Quirúrgicos Especializados S. A.

2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En la fase final de la fabricación de implantes para trauma óseo en acero 316 LVM, se procede a dar un acabado superficial; ya sea por pulido mecánico o por pulido electrolítico. El pulido mecánico origina una superficie con estructura amorfa y con posibles inclusiones, además en piezas irregulares se corre el riesgo de afectar la forma y las dimensiones, así que es más apropiado usar electropulido.

La empresa ha venido elaborando implantes de muy buena calidad mediante pulido mecánico en su etapa final de fabricación. Sin embargo, gestionó el actual proyecto en busca de que se establezca un procedimiento de electropulido con variables estándar para cada tipo de pieza, plana e irregular, de tal forma que se obtenga un mayor rendimiento de producción, mayor uniformidad de las piezas y la reducción del tiempo de pulido mecánico a sólo el tiempo de eliminación de las rebabas provenientes del proceso de mecanizado de las piezas.

La estandarización del proceso de electropulido se planeó para solucionar inconvenientes que se presentaron en prácticas anteriores y fueron manifiestas, para tener en cuenta en el alcance del proyecto, tales como, pérdida dimensional de la pieza, brillo localizado sólo en unas partes de la pieza, en ocasiones algunos poros y en otras oportunidades la formación de una capa de óxido protector que no le da el aspecto superficial deseado.

3. JUSTIFICACIÓN

Quirúrgicos Especializados S. A. es una empresa que se interesa en el mejoramiento y calidad de sus productos, en el avance y optimización de sus procesos, en la investigación y aplicación de nuevas tecnologías, en su posición a la vanguardia de la competitividad, demanda y exigencias del entorno en ingeniería biomédica, y sobre todo en contribuir en el mejoramiento de la calidad de vida de pacientes que padecen algún trauma óseo.

Para la empresa Quirúrgicos Especializados S. A. es importante usar electropulido para algunos de sus implantes de acero 316 LVM porque quiere mejorar las propiedades metalúrgicas de sus productos y disminuir tiempos de operación. Quiere que los dispositivos adquieran mediante un proceso electrolítico el brillo que se obtiene por pulido mecánico, pero con superficies menos rugosas, con mayor dureza y sin variaciones dimensionales. También desea aumentar la productividad, evitar reprocesos y disminuir el material de rechazo que se selecciona en el área de calidad de la empresa. Además, quiere que el protocolo desarrollado en este proyecto sea parte del proceso de documentación, desarrollo e implementación de la norma ISO 13485, como requisito de calidad en la fabricación de implantes.

Bajo el marco del proyecto Colciencias - Quirúrgicos Especializados S. A. - UIS: Estrategia de gestión en ciencia, tecnología e investigación hacia la consolidación de nuevos productos biomédicos de la empresa Quirúrgicos Especializados S. A. se estandarizó el electropulido de implantes de acero 316 LVM, mediante el desarrollo experimental en el Grupo de Investigación en Corrosión (GIC) y en la planta de fabricación de la empresa Quirúrgicos Especializados S. A. y aunque no se cumple a cabalidad con el alcance, el proyecto es importante en el proceso de consolidación de una propuesta de electropulido viable en cuanto a niveles de producción, simplicidad del método y equipos disponibles.

4. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

4.1. INFORMACIÓN GENERAL DE LA EMPRESA

La Tabla 1 presenta la información general de la empresa Quirúrgicos Especializados S. A.

Tabla 1. Información general de la empresa Quirúrgicos Especializados S. A.

Nombre	Quirúrgicos Especializados S. A.
Dirección de las oficinas	Calle 35 No. 24 – 11
Teléfono de las oficinas	6459996
Dirección de la planta de producción	Bulevar Bolívar No. 15 – 98
Teléfono de la planta de producción	6713986
Municipio	Bucaramanga
Departamento	Santander

Fuente: Quirúrgicos especializados S. A.

4.2. RESEÑA HISTÓRICA DE LA EMPRESA

En septiembre de 1995, siete jóvenes empresarios relacionados con el área de salud tomaron la iniciativa de suministrar implantes de osteosíntesis y el 19 de Febrero de 1996 constituyeron legalmente la empresa como sociedad limitada con un capital de diez millones de pesos y con la labor de tres operarios, convirtiéndose en la subdistribuidora de “Distribuciones Múltiple” de Medellín y de “Smith & Nephew Richards”. En el 2000 pasó a ser sociedad anónima, con el propósito de expandir la compañía al mercado de capitales y obtener fuentes de financiación, operando hasta el 2001 como subdistribuidor de reconocidas firmas a nivel mundial [4].

En la actualidad posee una sede de 450 m² en Bucaramanga, con quince trabajadores que mantienen el prestigio y buena imagen de la empresa con su buen desempeño, para así atender las demandas de clientes de Santander, Norte de Santander, Atlántico y Cesar [4].

4.3. PRODUCTOS FABRICADOS POR LA EMPRESA

Quirúrgicos Especializados S. A. fabrica una gama de productos en acero 316 LVM y Ti₆Al₄V, con sus respectivos instrumentales y accesorios (Tabla 2).

Tabla 2. Productos fabricados por la empresa Quirúrgicos Especializados S. A.

Implantes para trauma óseo		Sistemas de fijación externa	Sistemas de placas	Sistemas de fijación de columna	Sistemas de reconstrucción de tejidos blandos articulares
Tornillos	Corticales, esponjosos, maleolares y canulados.	Fijadores externos, transportadores y alargadores óseos.	D. H. S y D. C. S.	Fijaciones transpediculares y fijaciones toracolumbares por vía anterior.	Tornillos de interferencia, anclajes y suturas de hombro.
Placas	D. C. P, de elongación, de bajo contacto y de formas especiales.				
Accesorios	Arandelas, pines, clavos y alambres.				
Clavos	Intramedulares bloqueados rimados y no rimados.				

Fuente: Quirúrgicos Especializados S. A.

5. ESTADO DEL ARTE

En 1946, A. Pankratov realizó el electropulido de probetas de aceros al carbono, aleados e inoxidable con una densidad de corriente entre 3 mA/mm² y 6 mA/mm² a una temperatura entre 70 °C y 90 °C en un electrolito compuesto por ácido fosfórico, ácido sulfúrico, 3% p/v a 6% p/v de ácido crómico y agua. De esta experiencia se concluyó que a estas condiciones se obtienen superficies con mayor reflexividad o brillo por efecto del cromo [8].

En el 2000, Lee realizó el electropulido de acero 316 L con una densidad de corriente de 0,4 mA/mm² a 10 mA/mm², a una temperatura de 60 °C en un electrolito compuesto por ácido fosfórico, ácido sulfúrico y agua destilada. De esta experiencia se concluyó que el ácido fosfórico ocasiona una baja y uniforme disolución y el ácido sulfúrico causa una disolución inicial en la superficie de la pieza [6].

En el 2000, H. Hocheng, P. Kao y Y. Chen, realizaron el proceso de electropulido de acero inoxidable 316 L con una densidad de corriente de 5 mA/mm² a 10 mA/mm² durante un tiempo de proceso de 3 minutos a 5 minutos a una temperatura de 85 ± 10 °C en un electrolito con 10% v/v de agua y una relación de ácido sulfúrico y ácido ortofosfórico de 4: 6. Bajo estas condiciones se obtienen superficies con gran resistencia a la corrosión y con rugosidad de 0,8 µm para aplicación de la industria de semiconductores [9].

En el 2004, Andrade, realizó el electropulido de acero inoxidable AISI 304 con una densidad de corriente entre 2 mA/mm² y 4 mA/mm² durante 5 minutos y 30 minutos a una temperatura entre 30 °C y 55 °C en un electrolito compuesto por ácido crómico 2,5 M, ácido sulfúrico 5 M y agua destilada. De esta experiencia se concluyó que a mayor densidad de corriente y temperatura se obtiene una superficie lisa, de baja rugosidad y brillante [6].

En el 2005, A. Bhuyan, B. Gregory, H. Lei, S. Yee y Y. Gianchandani realizaron el electropulido de acero inoxidable para stents por pulsos de corriente directa de 50 Hz al 50% de ciclo de trabajo, con una densidad de corriente de 3,23 mA/mm² durante 90 segundos a una temperatura de 60 °C y agitación ultrasónica en un electrolito compuesto por 60% v/v de ácido fosfórico, 30 % v/v de ácido sulfúrico y 10% v/v de agua destilada. De acuerdo a estas condiciones se obtienen superficies con rugosidad de 0,05 µm y sin porosidad [3].

En el 2008, el Ing. D. Díaz realizó la metodología de los procesos electrolíticos de electropulido y anodizado de implantes de acero 316 LVM y de Ti₆Al₄V ELI en la empresa Quirúrgicos Especializados S. A. Los mejores resultados del proceso de electropulido de probetas de acero 316 LVM se obtuvieron con una corriente que oscila entre 3500 mA y 15000 mA durante 1 minuto, en un electrolito compuesto por 55% v/v de ácido ortofosfórico al 85% de pureza, 12% v/v de ácido sulfúrico al 96% de pureza y 33% v/v de agua destilada. De esta experiencia se concluyó que, a baja corriente y corto tiempo de proceso la pieza se pasiva y pierde el poco brillo que tenía antes del electropulido y que a alta corriente y largo tiempo de proceso la pieza tiene una pérdida dimensional considerable [4].

En el 2009, la norma ASTM E1558 para el pulido electrolítico de muestras metalográficas, presenta varias condiciones de electropulido efectivas para el acero 316 LVM considerado como un acero inoxidable austenítico, tales como: un electrolito compuesto por etanol y ácido ortofosfórico durante 10 minutos, con un voltaje no especificado. Un electrolito compuesto por agua, ácido ortofosfórico y ácido sulfúrico, con una densidad de corriente de 3 mA/mm² durante 2 minutos. Un electrolito compuesto por 260 ml de agua, 175 g de ácido crómico, 175 ml de ácido ortofosfórico al 85% de pureza y 580 ml de ácido sulfúrico, con una densidad de corriente de 6 mA/mm², durante 30 minutos a una temperatura entre 27 °C y 49 °C. Un electrolito compuesto por 240 ml de agua, 80 g de ácido crómico, 650 ml de

ácido ortofosfórico al 85% de pureza y 130 ml de ácido sulfúrico, con una densidad de corriente de 5 mA/mm², en un tiempo de 5 minutos a 60 minutos y a una temperatura entre 38 °C y 54 °C [1].

En el 2010, el Grupo de Investigación en Corrosión GIC, evaluó el estado superficial de probetas de 12 mm de diámetro y 2 mm de espesor de acero 316 LVM que fueron expuestas al proceso de electropulido, con una densidad de corriente de 6 mA/mm² durante 2 minutos y 5 minutos a 27 °C y 45 °C en un electrolito compuesto por ácido sulfúrico, ácido fosfórico y agua destilada. De esta experiencia se concluyó que la resistencia a la corrosión es proporcional al tiempo de proceso de electropulido [7].

En el 2010, Euro inox obtuvo el electropulido de piezas de acero inoxidable con un electrolito constituido por un volumen igual de mezcla de ácido sulfúrico al 96% y de ácido ortofosfórico al 85% de pureza, con una densidad de corriente de 0,5 mA/mm² a 2,5 mA/mm², una temperatura comprendida entre 40 °C y 75 °C, un tiempo de 2 minutos a 20 minutos y un cátodo de acero inoxidable, cobre o plomo [5].

6. MARCO TEÓRICO

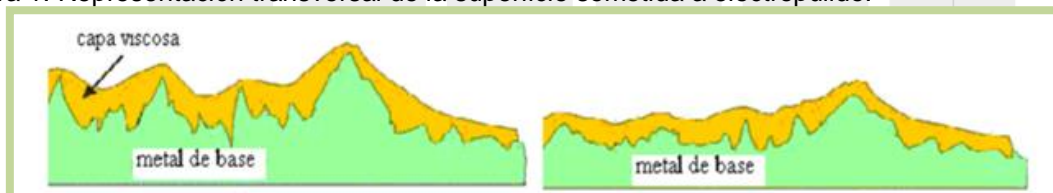


6.1. ELECTROPULIDO DE ACERO INOXIDABLE 316 LVM

Es la disolución anódica del acero inoxidable 316 LVM en estado transpasivo, que remueve las inclusiones no metálicas de la superficie y disminuye la rugosidad de la misma, mejorando su resistencia mecánica y a la corrosión. Es la formación de una capa viscosa, mediante la cual ocurren los procesos de disolución de iones y alisamiento superficial, que finalmente le confiere al acero protección estable y brillo [7].

Las reacciones electroquímicas que generan la disolución anódica por la aplicación de corriente, forman la capa superficial mediante el mecanismo difusivo. Las teorías que explican el proceso de remoción, se direccionan a la formación de la capa de Bailby, que es la capa de óxido que cubre los valles de la superficie y con una determinada gravedad específica y viscosidad, previene su disolución, así que esta capa crece, aumentando su resistencia hasta el punto en el que imposibilita la ocurrencia de la reacción electroquímica de oxidación. Simultáneamente, los picos de la superficie, no son cubiertos por esta capa y logran su disolución por la corriente aplicada [7] (Figura 1).

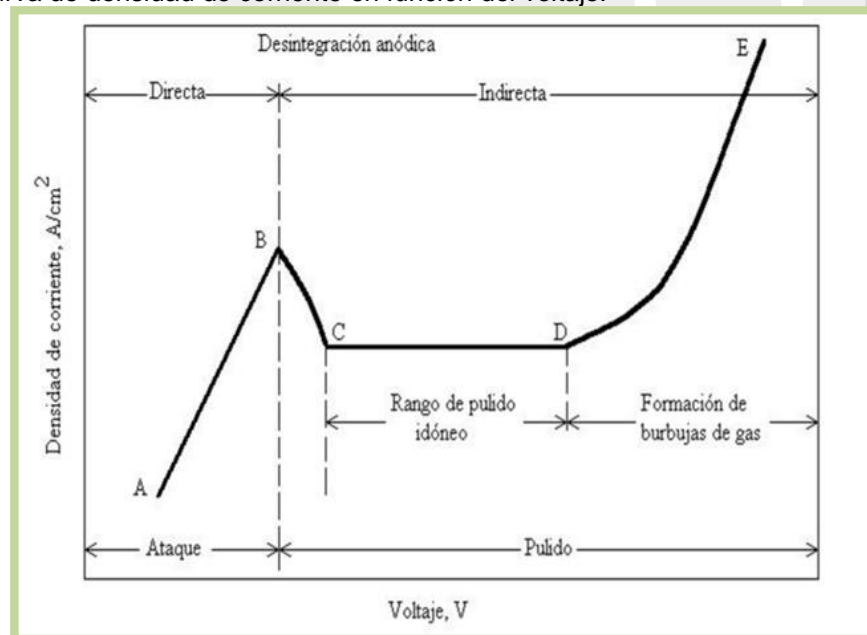
Figura 1. Representación transversal de la superficie sometida a electropulido.



Fuente: AYALA, Oscar y otros autores. Diseño y construcción de una celda para pulido y ataque electrolítico en muestras metalográficas. Trabajo de grado Ingeniero mecánico. El Salvador: Universidad de El Salvador, 2004. P. 6.

El factor esencial del proceso es la formación de la capa de Bailby, por lo tanto, si la velocidad de formación de dicha capa es inferior a la velocidad de difusión de la misma, el metal se disuelve tanto en los valles como en los picos y se obtiene un acabado mate, si su velocidad de formación es igual a su velocidad de difusión, se obtiene una capa saturada de iones del metal y a su vez resulta un proceso de acabado superficial óptimo, y si su velocidad de formación es superior a su velocidad de difusión, se produce abundante desprendimiento de burbujas de oxígeno en la superficie del acero que ocasiona un pulido irregular u ondulaciones superficiales [11]. Se usa para controlar y estudiar el mecanismo del proceso de electropulido la relación entre voltaje y densidad de corriente representada en la Figura 2. A lo largo de AB el acero es atacado químicamente, en BC hay oscilaciones periódicas de densidad de corriente, a lo largo de CD ocurre el pulido con densidad de corriente constante o límite de densidad de corriente, la calidad del pulido aumenta con el incremento del voltaje hasta D, y a lo largo de DE ocurre evolución de gas y la superficie se vuelve rugosa [2].

Figura 2. Curva de densidad de corriente en función del voltaje.



Fuente: INTERNATIONAL THE MATERIALS INFORMATION SOCIETY. Metallography and microstructures. ASM Handbook. Estados Unidos: Metals Handbook, 1995. Vol. 9.

Dos reacciones discretas en la superficie del ánodo son las responsables del mecanismo de electropulido; la formación de una capa viscosa de difusión que controla la suavidad de la superficie por disolución de picos por encima de $1\mu\text{m}$ y la formación de una película sólida delgada sobre la superficie que controla el brillo o disolución de picos inferiores a $0,01\mu\text{m}$, y así la remoción aleatoria de los iones metálicos debido a las vacancias catiónicas en la película causa abrillantamiento de la superficie [10]. La difusión de iones metálicos dentro de la solución en el estado de valencia más elevado permite las reacciones que se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Reacciones involucradas en el proceso de electropulido de acero inoxidable 316 LVM.

Reacción anódica superficial	Solución	Reacción catódica
Fe \rightarrow	Fe (III) + 3 e ⁻ \rightarrow	Fe (II)
Ni \rightarrow	Ni (II) + 2 e ⁻ \rightarrow	Ni (II)
Cr \rightarrow	Cr (VI) + 6 e ⁻ \rightarrow	Cr (III)

Fuente: IRVING, Charles. Electropolishing stainless steel implants. Memphis. P. 8.

El pulido mecánico produce una superficie especular debido a que obliga al material deformado a presentar un plano uniforme y refleja la luz en una sola dirección, en cambio, el electropulido produce una superficie libre de rayas y tensiones presentando una estructura tridimensional que refleja la luz en todas las direcciones. Así que, con el electropulido no se logra un brillo tipo espejo, pero sí se mantiene la reflexión por más tiempo que en superficies pulidas mecánicamente, el electropulido genera remoción uniforme del material sin fisuras por tensión y sin residuos metálicos, además elimina las distorsiones producidas por pulido mecánico, no tiene efectos significativos sobre las tensiones internas, ni causa deformaciones de la superficie, tiene efectos sobre la microdureza superficial del acero, genera limpieza química o ausencia de óxidos, y limpieza física o ausencia de grasa y granos abrasivos [2].

7. DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL

7.1. DISEÑO DE EXPERIMENTOS FACTORIAL FRACCIONADO

Se llevó a cabo un diseño experimental factorial en un paquete estadístico con tres variables independientes y dos niveles para cada una. Adicionalmente se programó una repetición para todos los ensayos. El sistema respectivo es $(2^3 + 1) \times 2 = 18$. La Tabla 4 muestra el diseño de experimentos factorial fraccionado.

Tabla 4. Diseño de experimentos factorial fraccionado.

Bloque	Densidad de corriente	Concentración	Tiempo
1	-1	-1	-1
1	1	-1	-1
1	-1	1	-1
1	1	1	-1
1	-1	-1	1
1	1	-1	1
1	-1	1	1
1	1	1	1
1	0	0	0
2	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
2	-1	1	-1
2	1	1	-1
2	-1	-1	1
2	1	-1	1
2	-1	1	1
2	1	1	1
2	0	0	0

7.2. MATERIALES PARA ELECTROPULIR

Se sometieron a electropulido los dispositivos para trauma óseo de acero 316 LVM fabricados por la empresa Quirúrgicos Especializados S. A., que se muestran en la Tabla 5, cuyo estado fue tal y como se recibió del proceso de maquinado de Control Numérico Computarizado (CNC). También se electropulieron probetas cilíndricas de acero 316 LVM, de 5 mm de radio y 2 mm de altura (Figura 3).

Figura 3. Probeta cilíndrica de acero inoxidable 316 LVM.

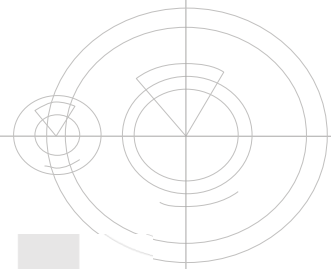





Tabla 5. Dispositivos para trauma óseo de acero inoxidable 316 LVM usados en el proceso de electropulido.

Tornillos	Nombre y descripción	Diámetro mm	Longitud mm	Masa g	Área superficial mm²
	Tornillo cortical estándar de acero inoxidable 316 LVM para pequeños fragmentos.	4	12	0,75	212,97
	Tornillo esponjoso canulado de acero inoxidable 316 LVM con rosca corta para grandes fragmentos.	6,5	40	5,33	1069,10
Placas	Nombre y descripción	No. Orificios	Longitud mm	Perfil mm x mm	Área superficial mm²
	Placa pequeños fragmentos DCP de acero inoxidable 316 LVM para las fracturas del radio y el cúbito.	5	61	3 x 10	1332
		6	73		1581,2
		7	85		1830,4

Continuación de la Tabla 5.

	Placa ancha DCP de	5	87	4,8 x 16	2951,3
	acero inoxidable 316	6	103		3452,6
	LVM para grandes	7	119		3953,9
	fragmentos, se usa como	8	135		4455,2
	elemento de compresión	9	151		4956,5
	en el fémur y para	10	167		5457,8
pseudoartrosis del	11	183	5959,1		
húmero.					
	Placa ancha reforzada	6	103	6,5 x 16	3649,02
	DCP de acero inoxidable	7	119		4170,02
	316 LVM para grandes	8	135		4691,02
	fragmentos, se usa como	9	151		5212,02
	elemento de compresión	10	167		5733,02
	en el fémur y para	11	183		6254,03
pseudoartrosis del					
húmero.					

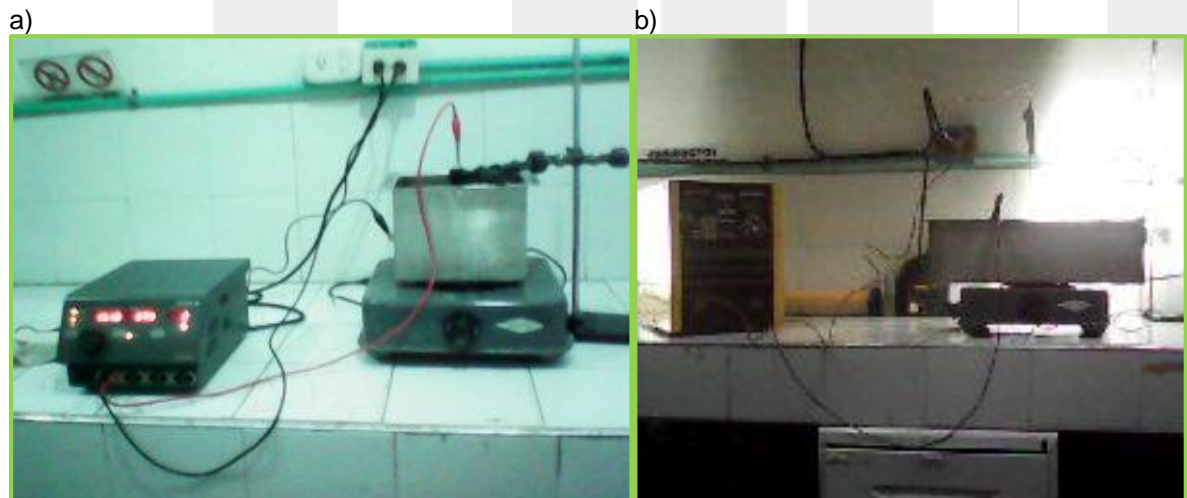
7.3. PROCESO DE ELECTROPULIDO

7.3.1. Materiales y equipos usados en electropulido. La cámara extractora de gases empleada en el laboratorio y la campana extractora de gases utilizada en la planta piloto son de tipo cerrada, debido a que la concentración de contaminantes en el aire extraído es mayor que la del aire local. La celda empleada es de acero inoxidable AISI 304 (Figuras 4 y 5) y se usa a la vez como cátodo, porque es un acero inoxidable austenítico resistente a la corrosión y con alta resistencia a la fluencia.

Figura 4. Montaje de la celda de electropulido a nivel de laboratorio, en las instalaciones del Grupo de Investigación en Corrosión (GIC).



Figura 5. Montaje de la celda de electropulido a nivel aplicación planta piloto, en las instalaciones de la empresa Quirúrgicos Especializados S. A. a) para tornillos corticales y esponjosos y b) para placas DCP.



Los materiales y equipos utilizados en la primera etapa de electropulido a nivel de laboratorio, en las instalaciones del Grupo de Investigación en Corrosión (GIC) son (Anexo A):

- Cámara extractora de gases.
- Fuente de corriente directa DC y cables.
- Celda de acero inoxidable AISI 304 (Cátodo).
- Baño ultrasónico.
- Balanza (g).
- Planchas de calentamiento (°C) con agitación (rpm).
- Agitador magnético.
- Termómetro.
- Ácido crómico, ácido ortofosfórico, ácido sulfúrico e hidróxido de sodio.
- Agua destilada.
- Pipeta y pera.
- Pinza.
- Vidrio reloj y espátula.
- Vaso de precipitado y probeta (ml).
- Rack en T de acero AISI 304, probetas cilíndricas, tornillos corticales y tornillos esponjosos de acero 316 LVM (Ánodo).
- Varilla de vidrio.
- Recipientes de vidrio oscuro para almacenar el electrolito y la solución de desengrase.
- Secador de aire caliente.
- Bata, guantes y tapabocas.
- Rugosímetro.

Los materiales y equipos utilizados en la segunda etapa de electropulido a nivel aplicación planta piloto, en las instalaciones de la empresa Quirúrgicos Especializados S. A. son (Anexo A):

- Campana extractora de gases.
- Fuente de corriente directa DC y cables.
- Celda de acero AISI 304 (Cátodo).
- Baño para calentamiento de la solución de desengrase.
- Balanza (g).
- Estufa de calentamiento (°C).
- Varilla de vidrio.
- Rack en T y rack de salientes múltiples de acero AISI 304, tornillos esponjosos y placas DCP de acero 316 LVM (Ánodo).
- Ácido crómico, ácido ortofosfórico, ácido sulfúrico e hidróxido de sodio.
- Agua.
- Pipeta y pera.
- Pinza.
- Termómetro.
- Vaso de precipitado y probeta (ml).
- Recipientes de vidrio oscuro para almacenar el electrolito y la solución de desengrase.
- Soplete de aire comprimido.
- Bata, guantes y tapabocas.

7.3.2. Reactivos usados en electropulido. El reactivo usado en la solución de desengrase es el hidróxido de sodio (NaOH) y los reactivos usados en el electrolito son el ácido ortofosfórico (H₃PO₄), el ácido sulfúrico (H₂SO₄) y el ácido crómico (CrO₃). La concentración de los constituyentes de cada electrolito para la fase experimental se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Concentración de los constituyentes para cada electrolito.

	Concentración [] de los constituyentes del electrolito en %v/v y %p/v*		
	Mínimo	Punto al centro	Máximo
Ácido ortofosfórico (H ₃ PO ₄)	45	65	86
Ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄)	34	15	0
Ácido crómico (CrO ₃)*	4*	6*	12*
Agua (H ₂ O)	17	14	2

En la Tabla 7 se muestra la determinación de la concentración y la relación en volumen de mezcla de los constituyentes del electrolito.

Tabla 7. Concentración y relación en volumen de mezcla de los constituyentes del electrolito.

	Pureza %	Densidad Kg/L y Kg/dm ³ *	Relación de masa MW g/mol	Masa molecular u.m.a
Ácido ortofosfórico (H ₃ PO ₄)	85	1,689 – 1,701	97,995	97,97
Ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄)	95 - 97	1,84	98,08	98,06
Ácido crómico (CrO ₃)		2,7*		100
Agua (H ₂ O)		1		18

Fuente: Etiquetas de los reactivos.

Se prepararon tres soluciones para la fase experimental con base en la concentración del ácido ortofosfórico, con un volumen de 2500 ml y un peso específico de 1,6 cada una, tal como se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Cantidad de los constituyentes para cada electrolito, según la concentración de ácido ortofosfórico.

Concentración de ácido ortofosfórico [H ₃ PO ₄] %v/v	A= ml H ₃ PO ₄	B= ml H ₂ SO ₄	C= g CrO ₃	D= ml H ₂ O
45	$A = \frac{45\% \times 1,6 \times 2500}{38,25\% \times 97,995} = 48$	$B = \frac{34\% \times 1,6 \times 2500}{32,98\% \times 98,08} = 42$	$C = \frac{4\% \times 1,6 \times 2500}{1000} = 16$	2410
65	$A = \frac{65\% \times 1,6 \times 2500}{38,25\% \times 97,995} = 69$	$B = \frac{15\% \times 1,6 \times 2500}{32,98\% \times 98,08} = 18$	$C = \frac{6\% \times 1,6 \times 2500}{1000} = 24$	2413
86	$A = \frac{86\% \times 1,6 \times 2500}{38,25\% \times 97,995} = 91$	B= 0	$C = \frac{12\% \times 1,6 \times 2500}{1000} = 48$	2409

7.3.3. Definición de las variables de electropulido

7.3.3.1. Primera etapa de electropulido a nivel de laboratorio. El electropulido es función de la densidad de corriente, de la diferencia de potencial entre los electrodos, de la preparación superficial del acero, de la composición y temperatura del electrolito, del arreglo de la celda y la duración del proceso, de modo que, las variables de la primera fase experimental a nivel de laboratorio para tornillos corticales se indican en la Tabla 9, cuyos ensayos se muestran en el Anexo B.

Tabla 9. Variables del proceso de electropulido.

Variables fijas	Temperatura: 80 °C		Ensayo	Ensayo para cada concentración	Repetición del ensayo	Ensayo con agitación a 150 rpm
	Agitación: 150 rpm		1	i= 639 mA t= 10 min	x	
Variables independientes	Concentración de ácido ortofosfórico [H ₃ PO ₄] %v/v	Mín= 45	2	i= 639 mA t= 4 min	x	
		Máx= 86	3	i= 639 mA t= 7 min	x	
		Punto al centro= 65	4	i= 852 mA t= 4 min	x	
	Tiempo t en minutos	Mín= 4	5	i= 852 mA t= 7 min	x	
		Máx= 10	6	i= 852 mA t= 10 min	x	
		Punto al centro= 7	7	i= 1065 mA t= 4 min	x	
	Densidad de corriente i en mA/mm ²	Mín= 3	8	i= 1065 mA t= 7 min	x	
Máx= 5		9	i= 1065 mA t= 10 min	x	x	
Punto al centro= 4						
Variable dependiente	Rugosidad f ([], t, i)					
Variables de respuesta	Brillo o reflexividad Dimensionamiento Microdureza					
Sistema	$(2^3 + 1) \times 2 = 18$					

Se decidió proseguir la segunda fase a nivel de laboratorio con densidades de corriente de 0,3 mA/mm² y 0,5 mA/mm², teniendo en cuenta que los dispositivos para trauma óseo de acero 316 LVM poseen gran área superficial, también se establecieron tiempos de 10 min, 20 min y 30 min, para el electropulido con la concentración de los constituyentes para cada electrolito de 45 %v/v H₃PO₄, 65 %v/v H₃PO₄ y 86 %v/v H₃PO₄, de las probetas cilíndricas de acero 316 LVM de 5 mm de radio, 2 mm de alto y con área superficial de 219,91 mm².

Las probetas se sometieron a desbaste superficial con papel abrasivo de carburo de silicio SiC números 240, 320, 400 y 600, para remover los defectos y las capas deformadas de procesos anteriores de corte y maquinado, antes de iniciar el proceso de desengrase, enjuague, electropulido, enjuague y secado. Las variables de la segunda fase experimental a nivel de laboratorio para las probetas cilíndricas de acero 316 LVM se indican en la Tabla 10, cuyos ensayos se muestran en el Anexo C.

Tabla 10. Variables modificadas del proceso de electropulido.

Ensayo	Densidad de corriente i mA/mm²	Corriente aplicada I mA	Tiempo t minutos	Temperatura T °C	Concentración [H₃PO₄] %v/v
1	0,3	66	20	41	86
2	0,3	66	30	42	86
3	0,5	110	20	42	86
4	0,5	110	30	42	86
5	0,5	110	10	35	65
6	0,3	66	20	42	65
7	0,3	66	30	42	65
8	0,5	110	20	43	65
9	0,5	110	30	44	65
10	0,3	66	20	36	45
11	0,3	66	30	36	45
12	0,5	110	20	38	45
13	0,5	110	30	38	45

Se estimó que de la segunda fase experimental a nivel de laboratorio, las variables para la aplicación planta piloto corresponden a una concentración de 65 %v/v H_3PO_4 , un tiempo de operación de 20 minutos, una temperatura de 80 °C y una densidad de corriente de 0,5 mA/mm².

7.3.3.2. Segunda etapa de electropulido a nivel aplicación planta piloto. En la primera fase de aplicación planta piloto se realizó el electropulido de tornillos esponjosos de acero 316 LVM con las variables estandarizadas obtenidas de la segunda fase experimental a nivel de laboratorio y se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11. Variables estandarizadas del proceso de electropulido.

Densidad de corriente i mA/mm ²	Tiempo t minutos	Temperatura T °C	Concentración [H ₃ PO ₄] %v/v
0,5	20	80	65

7.4. METODOLOGÍA DE ELECTROPULIDO ESTANDARIZADO

Para los tornillos corticales de acero 316 LVM que estaban muy sucios y con tinta roja se usó una solución de desengrase consistente en 8 g de hidróxido de sodio, 36 g de detergente y 400 ml de agua destilada. En cambio, para las probetas cilíndricas, los tornillos esponjosos y las placas DCP de acero 316 LVM se usó el 4 %p/v de hidróxido de sodio en agua destilada sin detergente. En el laboratorio se empleó un secador de aire caliente y en la empresa se usó un soplete de aire comprimido. Se estima que para aplicaciones posteriores es necesario filtrar el aire del compresor o usar un secador industrial.

En la Figura 6 se representa y se describe detalladamente la metodología del proceso de electropulido estandarizado de los dispositivos para trauma óseo de acero inoxidable 316 LVM, fabricados por la empresa Quirúrgicos Especializados S. A. Antes de realizar el proceso en mención, es necesario utilizar los implementos de protección física como guantes, botas, bata, tapabocas o máscara y gafas.

Figura 6. Metodología del proceso de electropulido estandarizado.

DESENGRASE, ENJUAGUE, ELECTROPULIDO, ENJUAGUE Y SECADO

Preparación de la solución de desengrase dentro de la cámara extractora de gases, y proceso de desengrase de los dispositivos para trauma óseo de acero 316 LVM.

Pesar 16 g de hidróxido de sodio NaOH y depositarlos en un vaso de precipitado que contenga 400 ml de agua destilada, introducir un agitador magnético en la solución, colocar dicho vaso de precipitado con los dispositivos de acero 316 LVM inmersos en la solución; en una plancha de calentamiento a 90 °C y 150 rpm de agitación durante 15 minutos, luego colocar el vaso de precipitado dentro del baño ultrasónico durante 10 minutos.

Enjuague de los dispositivos de acero 316 LVM desengrasados.

Enjuagar los dispositivos de acero 316 LVM con agua destilada, previamente calentada a 50 °C.

Secado de los dispositivos de acero 316 LVM enjuagados.

Con un secador industrial de aire caliente, secar de inmediato los dispositivos de acero 316 LVM enjuagados.

Preparación de 2500 ml del electrolito de concentración 65 %v/v H_3PO_4 dentro de la cámara extractora de gases.

En la celda de acero AISI 304 depositar 2413 ml de agua destilada, agregar 24 g de ácido crómico CrO_3 , mezclar con una varilla de vidrio, agregar 69 ml de ácido ortofosfórico H_3PO_4 , mezclar, verter despacio por goteo 18 ml de ácido sulfúrico H_2SO_4 e ir agitando lentamente la solución, luego colocar dicha celda en la plancha de calentamiento a 110 °C durante 5 minutos para que la solución adquiera el peso específico de 1,6, dejar enfriar el electrolito y envasar en un recipiente de vidrio oscuro para guardarla en la zona de almacenamiento y hacer uso de ella cuando sea necesario.

Proceso de electropulido de dispositivos de acero 316 LVM dentro de la cámara extractora de gases.

Depositar el electrolito en la celda de acero AISI 304, colocar la celda en la plancha de calentamiento a 80 °C durante 5 minutos, colocar la celda dentro de la campana extractora de gases, ajustar el rack en T o el rack de salientes múltiples dentro de la celda con una separación de 150 mm de las paredes y a 10 mm por debajo de la superficie del electrolito, conectar el rack al polo positivo de la fuente DC y conectar la celda al polo negativo, ajustar en la fuente un tiempo de 20 minutos para el proceso y una corriente de acuerdo al área superficial del ánodo y de acuerdo a una densidad de corriente de 0,5 mA/mm², y accionar la fuente.

Enjuague de los dispositivos de acero 316 LVM electropulidos.

Enjuagar consecutivamente en tres recipientes los dispositivos de acero 316 LVM con agua destilada, previamente calentada a 50 °C.

Secado de los dispositivos de acero 316 LVM enjuagados.

Con un secador industrial de aire caliente, secar de inmediato los dispositivos de acero 316 LVM enjuagados.

7.5. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN

Las métricas de calidad de los dispositivos electropulidos, fueron los resultados de:

- Rugosidad con el microscopio de fuerza atómica (AFM) en modo de operación de no contacto, que consiste en la atracción entre la punta y la superficie con una separación de 10 Å a 100 Å, cuyos resultados en formato HDF se desarrollaron con MATLAB. Para la toma de rugosidad de la superficie de los dispositivos para trauma óseo de acero 316 LVM, se sometieron al ensayo de microscopía de fuerza atómica (AFM), fragmentos rectangulares, prácticamente de geometría plana, que se cortaron de 1 cm de longitud de las placas DCP electropulida con las variables estandarizadas, pulida mecánicamente, y en estado de mecanizado.
- Análisis superficial con el microscopio electrónico de barrido (SEM) para obtener micrografías a 5000 X. Se tomaron tres probetas cilíndricas de acero 316 LVM de 5 mm de radio y 2 mm de altura, pulidas por lija 400 y 600, pulidas con un paño micro cloth y solución abrasiva de alúmina de 0,03 μm , y posteriormente electropulidas, bajo condiciones correspondientes a la de mayor brillo para cada concentración del electrolito, y se sometieron al ensayo de microscopía electrónica de barrido (SEM).
- Microdureza Vickers (HV) con el equipo Zwick/ Roell (Indentec). Para la toma de microdureza de las mismas tres probetas cilíndricas de acero inoxidable 316 LVM usadas en el ensayo de microscopía electrónica de barrido, en el estado mencionado de pulido con paño micro cloth y solución abrasiva de alúmina de 0,03 μm y electropulido, se efectuaron las mediciones de microdureza Vickers (HV) para capas superficiales, con el equipo Zwick/ Roell (Indentec) de Transejes S. A., con una carga de 500 g y bajo la norma ASTM E 92-82 de dureza Vickers de materiales metálicos.
- Brillo o reflexividad, con la inspección visual de los expertos.

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1. PRIMERA ETAPA DE ELECTROPULIDO A NIVEL DE LABORATORIO

El mejor resultado en cuanto a mayor brillo y menor rugosidad ($0,36 \mu\text{m}$), se obtuvo en el ensayo 9 del Anexo B (Figura 7), que corresponde al de mayor densidad de corriente (5 mA/mm^2) y mayor tiempo de electropulido (10 min) de las variables del proceso de electropulido. Debido a que la composición química de 65 %v/v H_3PO_4 proporcionó ensayos con mayor brillo, solo de dicha composición se tomaron los registros fotográficos, se hizo un ensayo con agitación y se tomó la rugosidad promedio en la zona plana de la cabeza de los tornillos corticales de acero 316 LVM con un rugosímetro (Anexo B). El ensayo con agitación presentó redondeamiento de las irregularidades de la rebaba, mayor homogeneidad y brillo de la superficie, pero sin gran diferencia del ensayo sin agitación (Figura 7).

Figura 7. Tornillos corticales de acero inoxidable 316 LVM del ensayo 9 del Anexo B.

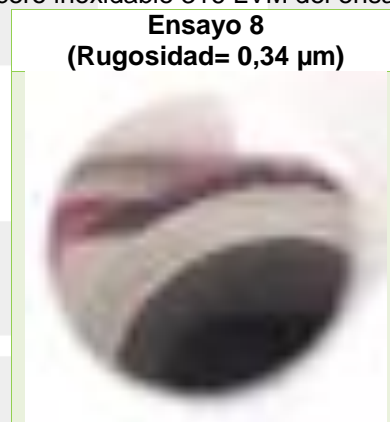


En esta primera fase a nivel de laboratorio se logró mayor brillo y homogeneidad superficial a mayor corriente aplicada y mayor tiempo de operación, además, se consideró que no se implementaría un agitador mecánico en la segunda fase experimental, ya que los resultados obtenidos son similares al proceso sin agitación y generaría mayor costo para la empresa en cuanto a su implementación en planta. También se decidió proseguir la segunda fase a nivel de laboratorio con densidades de corriente de $0,3 \text{ mA/mm}^2$ y $0,5 \text{ mA/mm}^2$, teniendo en cuenta que los dispositivos para trauma óseo de acero 316 LVM poseen gran área superficial, con tiempos de

10 min, 20 min y 30 min de electropulido, con probetas cilíndricas de acero 316 LVM de 5 mm de radio y 2 mm de alto, con área superficial de 219,91 mm² y con las concentraciones del electrolito de 45 %v/v H₃PO₄, 65 %v/v H₃PO₄ y 86 %v/v H₃PO₄.

El mejor resultado en cuanto a mayor brillo, se obtuvo en el ensayo 8 del Anexo C (Figura 8), que corresponde al ensayo con una densidad de corriente de 0,5 mA/mm², tiempo de electropulido de 20 min y concentración del electrolito de 65 %v/v H₃PO₄ de las variables modificadas del proceso de electropulido. Se tomaron registros fotográficos y la rugosidad promedio de las probetas cilíndricas de acero 316 LVM de cada ensayo (Anexo C). Se estimó que de la segunda fase experimental a nivel de laboratorio, las variables para la aplicación planta piloto corresponden a una concentración de 65 %v/v H₃PO₄, un tiempo de operación de 20 minutos y una densidad de corriente de 0,5 mA/mm², para obtener brillo superficial y una rugosidad con valores cercanos a 0,34 μm.

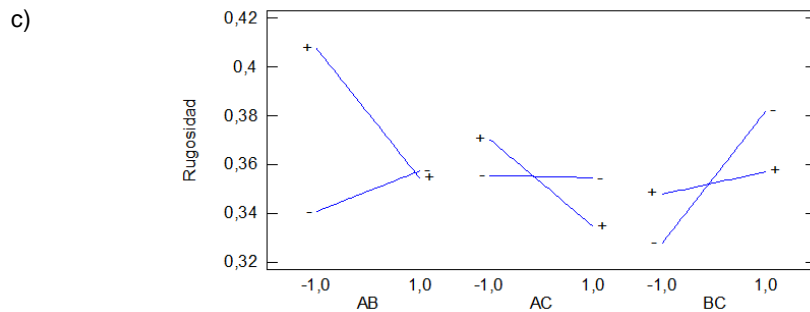
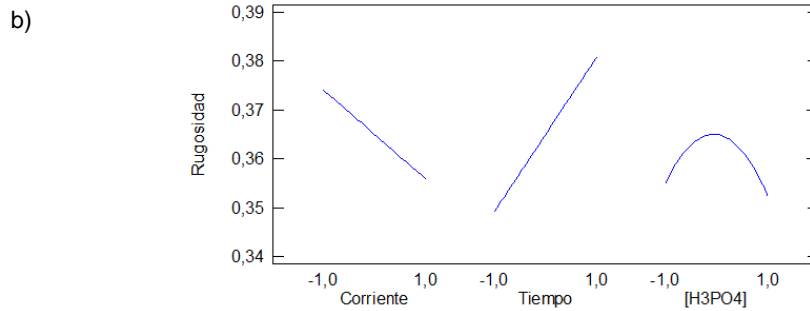
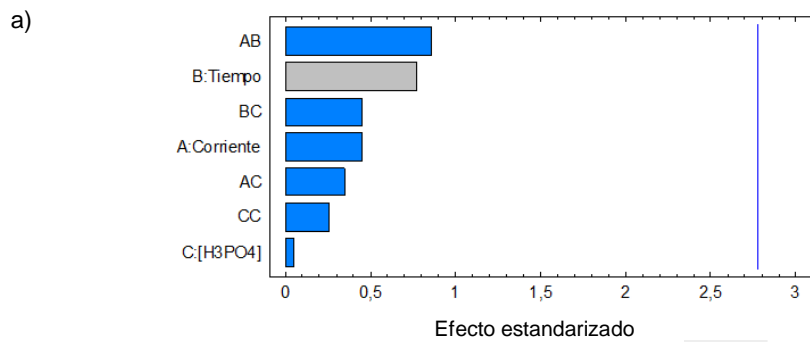
Figura 8. Probeta cilíndrica de acero inoxidable 316 LVM del ensayo 8 del Anexo C.



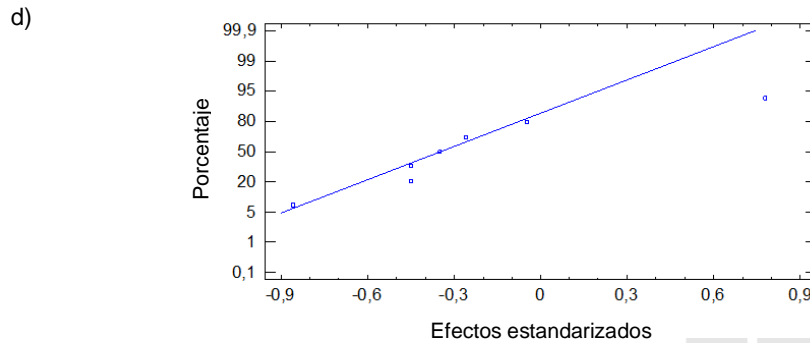
De acuerdo a la Figura 9, la variable de mayor influencia en la rugosidad es el tiempo de operación, seguido de la densidad de corriente y finalmente de la concentración (Figura 9 a)). La relación entre tiempo y densidad de corriente es la que principalmente controla el proceso de electropulido, seguido de la relación tiempo y concentración (Figura 9 a), b) y c)). Con el aumento de corriente hay mayor

disolución del ánodo y por consiguiente se registra menor rugosidad (Figura 9 b)) y las variables estandarizadas suavizan la superficie del acero inoxidable 316 LVM en un 80% (Figura 9 d)).

Figura 9. a) Diagrama de Pareto estandarizado para rugosidad, b) gráfico de efectos principales para rugosidad, c) gráfico de interacción para rugosidad y d) gráfico de probabilidad normal para rugosidad.



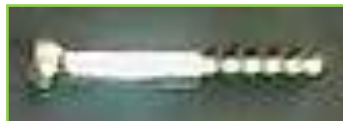
Continuación de la Figura 9.



8.2. SEGUNDA ETAPA DE ELECTROPULIDO A NIVEL APLICACIÓN PLANTA PILOTO

La Figura 10 es un registro fotográfico de uno de los tornillos esponjosos de acero 316 LVM electropulidos con las variables estandarizadas, que corresponde a una concentración de 65 %v/v H_3PO_4 , un tiempo de operación de 20 minutos, una temperatura de 80 °C y una densidad de corriente de 0,5 mA/mm².

Figura 10. Tornillo esponjoso de acero inoxidable 316 LVM electropulido con las variables estandarizadas.



En la segunda fase de aplicación planta piloto se realizó el electropulido de placas DCP de acero 316 LVM con las variables estandarizadas del proceso de electropulido. En la Figura 11 se muestra un registro fotográfico de una de las placas DCP de acero 316 LVM electropulidas con las variables estandarizadas y una no electropulida.

Figura 11. Placas DCP de acero inoxidable 316 LVM electropulida con las variables estandarizadas y no electropulida.



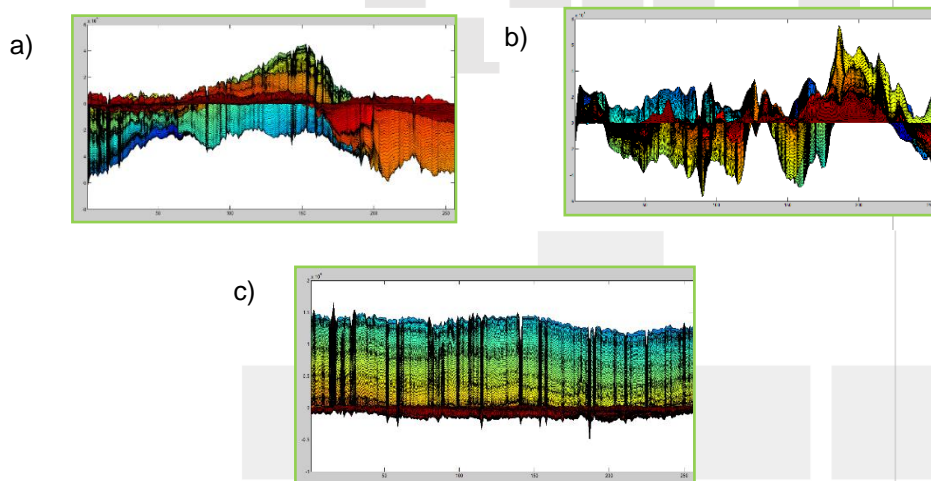
El brillo de la superficie del acero inoxidable 316 LVM se evaluó por inspección visual y observación en el microscopio. Se obtuvieron tornillos corticales y esponjosos de acero 316 LVM brillantes por la distribución de la corriente a través de un rack en T, ya sea para pocos o muchos tornillos a la vez en el proceso de electropulido estandarizado. En cambio, se obtuvieron placas DCP de acero 316 LVM brillantes para pocas y no brillantes para muchas placas DCP a la vez en el proceso de electropulido estandarizado, por la distribución de la corriente por medio de un rack de salientes múltiples. Se asume que se debe al área superficial electropulida en relación a la corriente aplicada.

8.3. AFM

En la rugosidad por AFM de la superficie de las placas DCP de acero inoxidable 316 LVM (Figura 12), se presenta una relación de rugosidad pico a valle distante en la placa DCP de acero 316 LVM pulida mecánicamente (Rugosidad= $0,52 \mu\text{m}$), distante en la placa DCP de acero 316 LVM en estado de mecanizado (Rugosidad= $0,51 \mu\text{m}$) y muy cercana en la placa DCP de acero 316 LVM electropulida con las variables estandarizadas (Rugosidad= $0,08 \mu\text{m}$), de modo que se obtuvo una disminución significativa de la rugosidad y un suavizado de la superficie mediante electropulido. Además, se presentan picos y valles muy distantes en la placa DCP de acero 316 LVM pulida mecánicamente (Figura 12 a)), gran cantidad de valles en la placa DCP de acero 316 LVM en estado de mecanizado (Figura 12 b)) y mayor homogeneidad superficial, pocos picos y valles,

que a su vez son cercanos y mejor orientados en la placa DCP de acero 316 LVM electropulida con las variables del proceso de electropulido estandarizado (Figura 12 c)), que corresponden a un electrolito de concentración 65 %v/v H_3PO_4 , un tiempo de operación de 20 minutos, una temperatura de 80 °C y una densidad de corriente de 0,5 mA/mm².

Figura 12. Rugosidad por AFM en formato HDF, representada en un gráfico de área con el visualizador MATLAB, de la superficie de las placas DCP de acero 316 LVM a) pulida mecánicamente, b) en estado de mecanizado y c) electropulida con las variables estandarizadas.



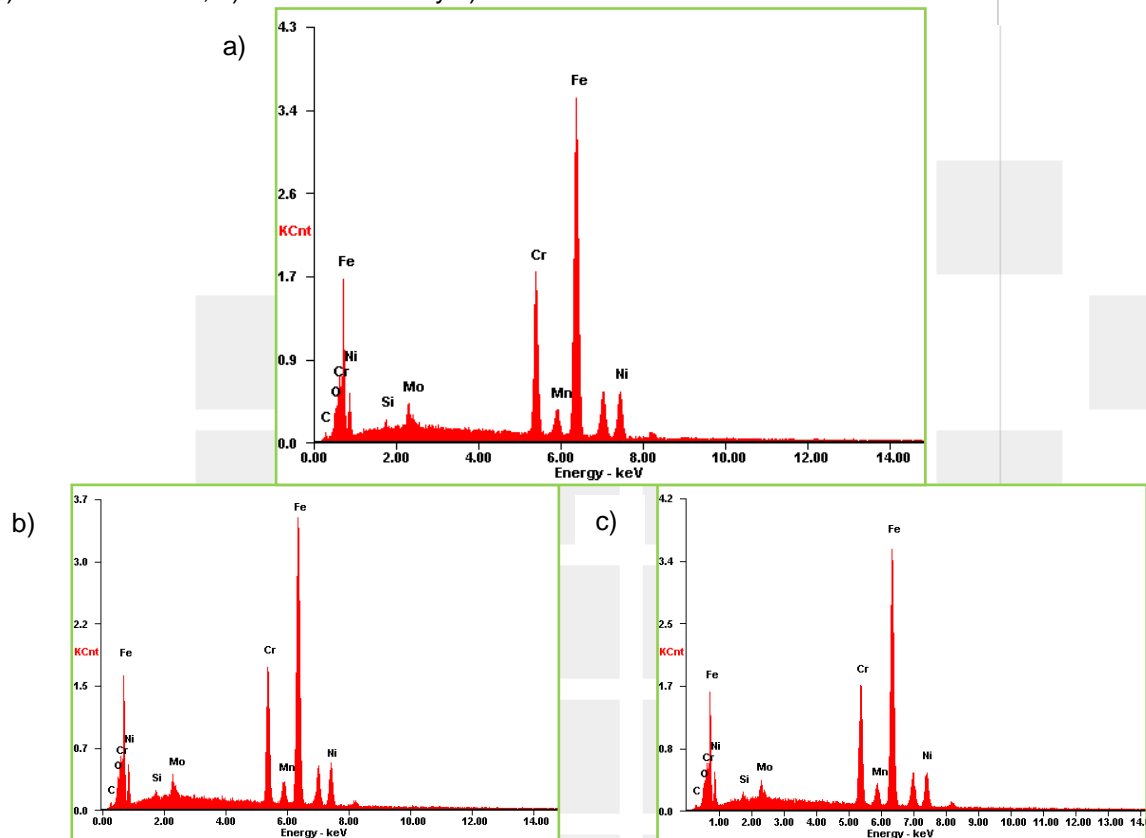
Fuente: Resultados de AFM en formato HDF entregados por el laboratorio de microscopía del Parque Tecnológico de Guatiguará y graficados por el autor con el visualizador MATLAB.

8.4. SEM

Las condiciones de electropulido estandarizadas, correspondiente al electropulido del acero 316 LVM con un electrolito de composición 65 %v/v H_3PO_4 , presenta una superficie libre de porosidad y con líneas de pulido mecánico suavizadas (Figura 14 a)), debido a la adecuada relación de composición de los constituyentes del electrolito, especialmente del ácido sulfúrico y ácido crómico. No hay presencia de óxido de cromo, de modo que sí ocurrió la disolución del ánodo (Figura 13). El acero 316 LVM electropulido con un electrolito de composición 86 %v/v H_3PO_4 , posee líneas de pulido mecánico marcadas y poros pequeños (Figura 14 b)), debido a la ausencia de ácido sulfúrico y a la composición significativa de ácido crómico del

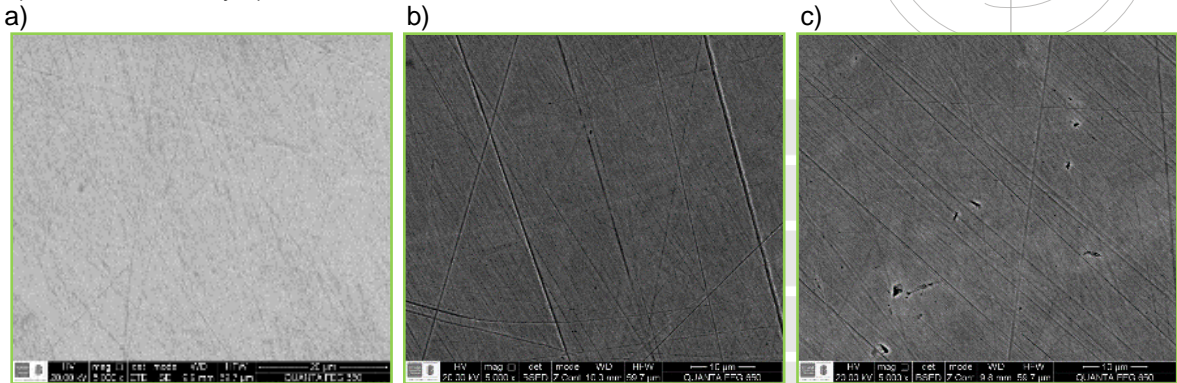
electrolito. El acero 316 LVM electropulido con un electrolito de composición 45 %v/v H_3PO_4 , presenta líneas de pulido mecánico suaves y poros grandes (Figura 14 c)), por la alta composición de ácido sulfúrico y la baja composición de ácido crómico del electrolito. Se deduce que la composición de ácido sulfúrico influye significativamente en la disolución del ánodo, y que la composición de ácido crómico influye en la disminución de la porosidad y en el brillo de la superficie del acero 316 LVM, sin embargo, para obtener un electropulido óptimo es necesario mantener unas relaciones de composición de los constituyentes adecuada, como en el caso de la solución de electropulido estandarizada.

Figura 13. Espectroscopías por SEM de los elementos químicos, presentes en la superficie de las probetas cilíndricas de acero 316 LVM electropulidas con electrolitos de concentración a) 65 %v/v H_3PO_4 , b) 86 %v/v H_3PO_4 y c) 45 %v/v H_3PO_4 .



Fuente: Resultados de SEM entregados por el laboratorio de microscopía del Parque Tecnológico de Guatiguará.

Figura 14. Micrografías electrónicas por SEM tomadas a 5000 X, de la superficie de las probetas cilíndricas de acero 316 LVM electropulidas con electrolitos de concentración a) 65 %v/v H₃PO₄, b) 86 %v/v H₃PO₄ y c) 45 %v/v H₃PO₄.



Fuente: Resultados de SEM a 5000 X entregados por el laboratorio de microscopía del Parque Tecnológico de Guatimar.

8.5. MICRODUREZA

De acuerdo a la Tabla 12 la probeta 1 corresponde a la electropulida con un electrolito de concentración 65 %v/v H₃PO₄ y se obtuvo una microdureza promedio de 335 HV, la probeta 2 es la electropulida con un electrolito de concentración 86 %v/v H₃PO₄ con una microdureza promedio de 337 HV, y la probeta 3 a una electropulida con un electrolito de concentración 45 %v/v H₃PO₄ de microdureza promedio 336 HV. Las microdurezas promedio de las probetas cilíndricas de acero 316 LVM bajo dichas condiciones son similares, sin embargo, se asume que el proceso de electropulido de acero inoxidable 316 LVM aumenta un poco la microdureza de la superficie de los dispositivos para trauma óseo.

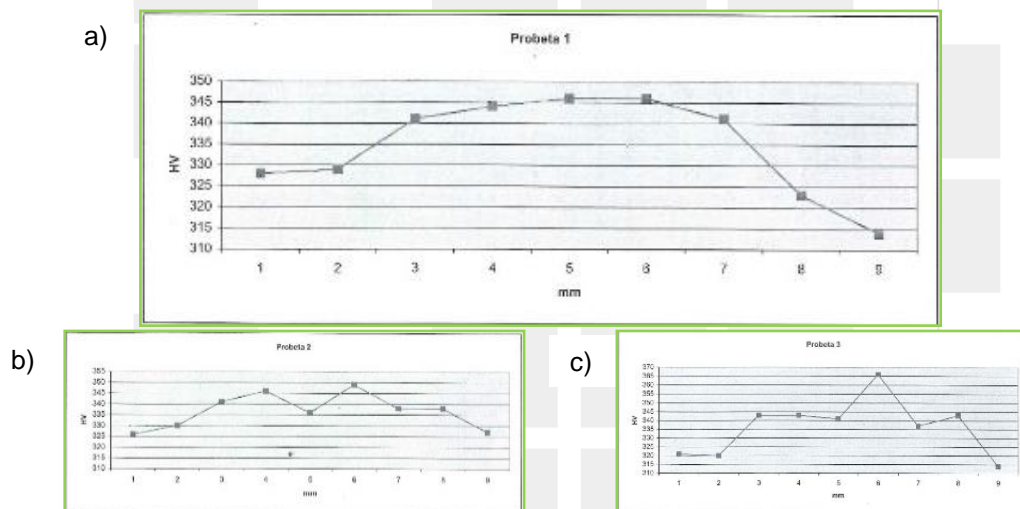
Tabla 12. Microdureza de las probetas cilíndricas de acero 316 LVM electropulidas con electrolitos de concentración 65 %v/v H₃PO₄, 86 %v/v H₃PO₄ y 45 %v/v H₃PO₄.

Medición	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
	HV	HV	HV
1	328	326	321
2	329	330	320
3	341	341	343
4	344	346	343
5	346	336	341
6	346	349	366
7	341	338	337
8	323	338	343
9	314	327	314

Fuente: Resultados de microdureza Vickers con una carga de 500 g, entregados por el laboratorio de Transejes S. A.

Se deduce que la probeta cilíndrica de acero 316 LVM electropulida con un electrolito de concentración 65 %v/v H₃PO₄ mantiene una microdureza más uniforme a lo largo de su diámetro, también que se obtiene mayor microdureza en el centro y menor microdureza en los bordes de la probeta (Figura 15 a)).

Figura 15. Microdureza Vickers de las probetas cilíndricas de acero 316 LVM electropulidas con electrolitos de concentración a) 65 %v/v H₃PO₄, b) 86 %v/v H₃PO₄ y c) 45 %v/v H₃PO₄.



Fuente: Resultados de microdureza Vickers con una carga de 500 g, entregados por el laboratorio de Transejes S. A.

Se tomaron las mediciones de microdureza de las tres placas DCP de acero 316 LVM completas, antes de fragmentarlas para el ensayo de microscopía de fuerza atómica, en cuatro puntos como se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13. Microdureza de las placas DCP de acero 316 LVM en estado de mecanizado, pulida mecánicamente y electropulida.

Medición	Placa DCP en estado de mecanizado HV	Placa DCP pulida mecánicamente HV	Placa DCP electropulida HV
1	340	337	349
2	331	357	334
3	355	335	358
4	345	346	345

Fuente: Resultados de microdureza Vickers con una carga de 500 g, entregados por el laboratorio de Transejes S. A.

La placa DCP de acero 316 LVM en estado de mecanizado presenta una microdureza promedio de 343 HV, la placa DCP de acero 316 LVM pulida mecánicamente tiene una microdureza promedio de 344 HV, y la placa DCP de acero 316 LVM electropulida posee una microdureza promedio de 346 HV. Se deduce que el proceso de electropulido aumenta ligeramente la microdureza del acero inoxidable 316 LVM.

9. CONCLUSIONES

Se estandarizó el electropulido de dispositivos para trauma óseo de acero 316 LVM, fabricados por la empresa Quirúrgicos Especializados S. A. y se desarrolló el respectivo protocolo, bajo las condiciones de composición del electrolito de 65 %v/v H_3PO_4 , tiempo de proceso de 20 minutos, densidad de corriente de 0,5 mA/mm², temperatura de 80 °C y la metodología del proceso de electropulido estandarizado. Se concluye que con estas condiciones de electropulido, se obtiene suavizado de la superficie, brillo superficial del acero 316 LVM, un ligero aumento de microdureza y una disminución de la rugosidad con valores comprendidos entre 0.08 μm y 0,34 μm de rugosidad.

El electropulido de acero 316 LVM desarrollado en este proyecto reduce el tiempo de operación a solo la eliminación de las rebabas, desengrase, enjuague, electropulido, enjuague y secado, proporciona un acabado superficial libre de porosidad, homogéneo, brillante y con un rango dimensional óptimo, con la limitante de que se obtienen superficies brillantes en el electropulido de varios dispositivos para trauma óseo de acero 316 LVM de poca área a la vez, con área total del ánodo inferior a 5000 mm² y por eso no es un proceso estandarizado útil para producción, debido a la relación área y corriente aplicada.

El brillo obtenido por electropulido es menos reflexivo que el brillo de un dispositivo para trauma óseo de acero 316 LVM pulido mecánicamente y se atribuye este comportamiento a la orientación de los planos que genera cada proceso.

Según los resultados obtenidos, se concluye que el ácido sulfúrico permite la suavización superficial o disolución del ánodo y el ácido crómico proporciona una superficie brillante y libre de porosidad, y la relación entre tiempo y densidad de corriente es la que principalmente controla el proceso de electropulido.

CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard guide for electrolytic polishing of metallographic specimens. ASTM E 1558-09. Estados Unidos: El Instituto, 2009. 10 p.
- [2] AYALA, Oscar y otros autores. Diseño y construcción de una celda para pulido y ataque electrolítico en muestras metalográficas. Trabajo de grado Ingeniero mecánico. El Salvador: Universidad de El Salvador, 2004. 6 p.
- [3] BHUYAN, Anshuman y otros autores. Pulse and DC electropolishing of stainless steel for stents and other devices [En línea]. Estados Unidos: Universidad de Michigan. Departamento de Ingeniería eléctrica y Ciencia de la computación, 2005. 4 p. Habilitado en la web:
http://web.eecs.umich.edu/~yogesh/pdfs/conferencepapers/Sensors05_ElectroPolishSteel.pdf.
- [4] DÍAZ, Diego. Implementación metodológica de los procesos electrolíticos de electropulido y anodizado de implantes de 316 LVM y Ti₆Al₄V ELI en la empresa Quirúrgicos Especializados S. A. Trabajo de grado Ingeniero metalúrgico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, 2008. 83 p.
- [5] EURO INOX. The European Stainless Steel Development Association. Electropulido de Aceros Inoxidables. Series de Materiales y Aplicaciones [En línea]. Bruselas: Euro Inox, 2010. Vol. 11. 16 p. Habilitado en la web:
http://www.euro-inox.org/pdf/map/Electropolishing_SP.pdf.

- [6] FUENTES, Pilar. VILLAMIZAR, Lorena. Evaluación electroquímica del estado superficial de aleaciones Ti₆Al₄V y acero inoxidable 316 L, usadas como implantes temporales. Trabajo de grado Ingeniero metalúrgico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas, 2006. 4 p.
- [7] GIC. Grupo de Investigación en Corrosión. Pulido electroquímico de dispositivos metálicos en la industria de los implantes biomédicos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2010. 5 p.
- [8] GRILIJES, Fedotiev. Electropulido y anodización de metales. Barcelona: Gustavo Gili, 1972. 150 p.
- [9] HOCHENG, H. y otros autores. Electropolishing of 316 L stainless steel for anticorrosion passivation [En línea]. American Society for Metals ASM: Journal of Materials Engineering and Performance, 2001. Vol. 10. 5 p. Habilitado en la web: http://maps.pme.nthu.edu.tw/web_maps/PDF/PUBLICATION-TEXT/045.pdf.
- [10] IRVING, Charles. Electropolishing stainless steel implants. Memphis. 3 p.
- [11] PÉREZ, Ramsés. Desarrollo de un proceso de fabricación en serie de clavos de Schanz y alambres de Kirschner. Trabajo de grado Ingeniero mecánico. Caracas: Universidad Central de Venezuela, 2004. 30 p.

BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard specification for stainless steel bars and shapes. ASTM A 276-92. Estados Unidos: El Instituto, 1992. 8 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard specification for passivation of stainless steel using electropolishing. ASTM B 912-02. Estados Unidos: El Instituto, 2003. 4 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test methods for determining average grain size. ASTM E 112. Estados Unidos: El Instituto, 1996. 28 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard guide for electrolytic polishing of metallographic specimens. ASTM E 1558-09. Estados Unidos: El Instituto, 2009. 10 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard specification for wrought 18 Chromium- 14 Nickel- 2.5 Molybdenum stainless steel bar and wire for surgical implants. ASTM F 138-00. Estados Unidos: El Instituto, 2000. 5 p.

AYALA, Oscar y otros autores. Diseño y construcción de una celda para pulido y ataque electrolítico en muestras metalográficas. Trabajo de grado Ingeniero mecánico. El Salvador: Universidad de El Salvador, 2004. 6 p.

BHUYAN, Anshuman y otros autores. Pulse and DC electropolishing of stainless steel for stents and other devices [En línea]. Estados Unidos: Universidad de Michigan. Departamento de Ingeniería eléctrica y Ciencia de la computación, 2005. 4 p. Habilitado en la web:

http://web.eecs.umich.edu/~yogesh/pdfs/conferencepapers/Sensors05_ElectroPolishSteel.pdf.

CONSEJO COLOMBIANO DE SEGURIDAD. Hoja de datos de seguridad ácido sulfúrico [En línea]. Bogotá: La Institución, 2005. 5 p. Habilitado en la web: http://portalweb.ucatolica.edu.co/easyWeb2/files/56_12711_agua-bateria-acido-sulfurico.pdf.

DÍAZ, Diego. Implementación metodológica de los procesos electrolíticos de electropulido y anodizado de implantes de 316 LVM y Ti₆Al₄V ELI en la empresa Quirúrgicos Especializados S. A. Trabajo de grado Ingeniero metalúrgico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas, 2008. 83 p.

EURO INOX. The European Stainless Steel Development Association. Electropulido de Aceros Inoxidables. Series de Materiales y Aplicaciones [En línea]. Bruselas: Euro Inox, 2010. Vol. 11. 16 p. Habilitado en la web: http://www.euro-inox.org/pdf/map/Electropolishing_SP.pdf.

FICHAS INTERNACIONALES DE SEGURIDAD QUÍMICA. Ácido ortofosfórico [En línea]. La Institución, 2005. 2 p. Habilitado en la web: <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/FISQ/Ficheros/1001a1100/nspn1008.pdf>.

FICHAS INTERNACIONALES DE SEGURIDAD QUÍMICA. Hidróxido de sodio [En línea]. La Institución, 2010. 2 p. Habilitado en la web:

<http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/FISQ/Ficheros/301a400/nspn0360.pdf>.

FICHAS INTERNACIONALES DE SEGURIDAD QUÍMICA. Trióxido de cromo [En línea]. La Institución, 2004. 2 p. Habilitado en la web:

<http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/FISQ/Ficheros/1101a1200/nspn1194.pdf>.

FUENTES, Pilar. VILLAMIZAR, Lorena. Evaluación electroquímica del estado superficial de aleaciones Ti_6Al_4V y acero inoxidable 316 L, usadas como implantes temporales. Trabajo de grado Ingeniero metalúrgico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, 2006. 4 p.

GIC. Grupo de Investigación en Corrosión. Pulido electroquímico de dispositivos metálicos en la industria de los implantes biomédicos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2010. 5 p.

GRILIJES, Fedotiev. Electropolido y anodización de metales. Barcelona: Gustavo Gili, 1972. 150 p.

HOCHENG, H. y otros autores. Electropolishing of 316 L stainless steel for anticorrosion passivation [En línea]. American Society for Metals ASM: Journal of Materials Engineering and Performance, 2001. Vol. 10. 5 p.

Habilitado en la web: http://maps.pme.nthu.edu.tw/web_maps/PDF/PUBLICATION-TEXT/045.pdf.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. Implants for surgery – Metallic materials – Part 1: Wrought stainless steel. ISO 5832-1. Londres: La Institución, 2007. 6 p.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. Medical devices – Quality management systems – Requirements for regulatory purposes. ISO 13485. Londres: La Institución, 2003. 64 p.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. Metallic and other inorganic coatings – Electropolishing as a means of smoothing and passivating stainless steel. ISO 15730. Londres: La Institución, 2000. 8 p.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. Metallic materials for surgical implants. Specification for wrought stainless steel. ISO 5832-1 BS 7252-1. Londres: La Institución, 1990.

INTERNATIONAL THE MATERIALS INFORMATION SOCIETY. Metallography and microstructures. ASM Handbook. Estados Unidos: Metals Handbook, 1995. Vol. 9.

IRVING, Charles. Electropolishing stainless steel implants. Memphis. 3 p.

MONTAÑEZ, Nerly. Proyecto estrategia de gestión en ciencia, tecnología e investigación hacia la consolidación de nuevos productos biomédicos de la empresa Quirúrgicos Especializados S. A. Trabajo de investigación principal. Bucaramanga, 2012. 17 p.

PÉREZ, Ramsés. Desarrollo de un proceso de fabricación en serie de clavos de Schanz y alambres de Kirschner. Trabajo de grado Ingeniero mecánico. Caracas: Universidad Central de Venezuela, 2004. 30 p.



ANEXOS

Anexo A. Algunos materiales y equipos utilizados en el laboratorio del Grupo de Investigación en Corrosión (GIC) y en la planta de la empresa Quirúrgicos Especializados S. A.

Fuente de corriente directa DC



Celda de acero inoxidable AISI 304



Plancha de calentamiento (°C) con agitación (rpm)



Baño para calentamiento de la solución de desengrase



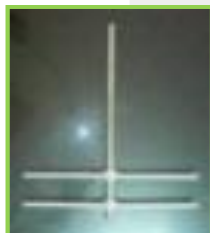
Rugosímetro



Ácido crómico, ácido ortofosfórico, ácido sulfúrico e hidróxido de sodio



Rack en T de acero AISI 304



Rack de salientes múltiples de acero AISI 304








Anexo B. Tornillos corticales de acero inoxidable 316 LVM electropulidos, con las variables del proceso de electropulido de la Tabla 9.






Ensayo	1	2	3	4
Rugosidad μm	0,44	0,44	0,44	0,43
Ensayo y Repetición				

Ensayo	5	6	7	8
Rugosidad μm	0,43	0,43	0,36	0,36
Ensayo y Repetición				

Ensayo	9	Tornillo cortical desengrasado, ensayo de mayor brillo y ensayo con agitación
Rugosidad μm	0,36	
Ensayo y Repetición		

Anexo C. Probetas cilíndricas de acero inoxidable 316 LVM electropulidas, con las variables modificadas del proceso de electropulido de la Tabla 10.

Ensayo	1	2	3	4	5
Rugosidad μm	0,42	0,48	0,42	0,42	0,41
Ensayo y repetición					

Ensayo	6	7	8	9	10
Rugosidad μm	0,36	0,37	0,34	0,35	0,30
Ensayo y repetición					

Ensayo	11	12	13
Rugosidad μm	0,33	0,28	0,29
Ensayo y repetición	