

**ESTADO DEL ARTE DEL ELECTROPULIDO EN ACEROS INOXIDABLES**

**GERMÁN SICACHÁ ROJAS**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN DE LA INTEGRIDAD Y CORROSIÓN  
BOGOTÁ D.C.**

**2018**

# **ESTADO DEL ARTE DEL ELECTROPULIDO EN ACEROS INOXIDABLES**

**GERMÁN SICACHÁ ROJAS**

Monografía para obtener el título de especialista en Gestión de la Integridad y la Corrosión

**Director: Ph.D. ENRRIQUE VERA**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN DE LA INTEGRIDAD Y CORROSIÓN  
BOGOTÁ D.C.**

**2018**

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Bogotá, 2 de noviembre de 2018

La autoridad científica de la Facultad de Ingeniería, reside en ella misma, por lo tanto no responde por las opiniones expresadas en este trabajo de grado

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	7
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	7
1.1 Diagnóstico .....	7
1.2 Problema .....	7
2 METODOLOGÍA.....	8
2.1 Descripción general .....	8
2.2 Procesamiento y análisis de la información .....	8
3 ELECTROPULIDO .....	9
3.1 Electropulido .....	10
3.2 Proceso:.....	12
3.3 Rugosidades obtenidas .....	13
3.4 Mecanismos de Electropulido .....	15
3.5 Ataque del electrolítico.....	19
CONCLUSIONES .....	26
BIBLIOGRAFÍA.....	27

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Metodología del estado del arte.....	8
Figura 2. Instalación típica de electropulido, la pieza a electropulir se fija al soporte y este es conectado al polo positivo de la fuente de corriente continua .....	11
Figura 3. Parámetro de rugosidad Ra.....	13
Figura 4. Curva de la densidad de corriente en función del voltaje.....	17
Figura 5. Procedimiento para el electropulido.....	18
Figura 6. Imágenes de la morfología tridimensional a) de CPS y b) ESP, obtenidas con microscopio de fuerza atómica.....	24

## **INTRODUCCIÓN**

En este trabajo se presenta por medio de una investigación documental un estado del arte que busca generar un conocimiento específico sobre el proceso de electropulido en aceros inoxidable, de como inciden las variables del proceso en la rugosidad superficial y el brillo de las superficies metálicas. La necesidad de plantear un estado del arte nace debido a que se requiere visualizar a quienes han trabajado en los temas relacionados con electropulido y que tipo de variables han analizado y los resultados obtenidos.

### **1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **1.1 Diagnóstico**

Después de realizar una exploración de la literatura académica que se está produciendo en el mundo científico, se evidencia la inexistencia de una base teórica completa sobre la que se sustente el proceso de electropulido en términos de las rugosidades y brillo de las superficies de aceros inoxidable.

#### **1.2 Problema**

El problema que aborda el presente proyecto de grado es elaborar un estado del arte que responda los siguientes temas: efecto de la composición de los electrolitos, efecto de la separación de los electrodos, temperatura de la solución, densidad de corriente y rugosidad inicial. Para el desarrollo se tomarán en cuenta artículos y libros publicados, adicionalmente todo el material divulgado de calidad permanente.

## 2 METODOLOGÍA

### 2.1 Descripción general

Para el análisis de la información recolectada se limitó al período entre el año 2003 y 2018, se hallaron diferentes fuentes, artículos científicos conseguidos en bases de datos de revistas internacionales, informes de investigación, entre otras. En lo que corresponde al criterio de búsqueda se tomaron: parámetros de electropulido, electropulido en aceros inoxidables. A partir de la información recolectada se llevó a cabo un estudio documental minucioso, siguiendo una metodología consistente primordialmente en la presentación selectiva de los hallazgos publicados por los investigadores sobre el tema. Adicionalmente se desea presentar las coincidencias entre los diferentes autores.

### 2.2 Procesamiento y análisis de la información

En la figura 1, se presenta el desarrollo del proyecto secuencialmente y como se abordó la metodología del proyecto.

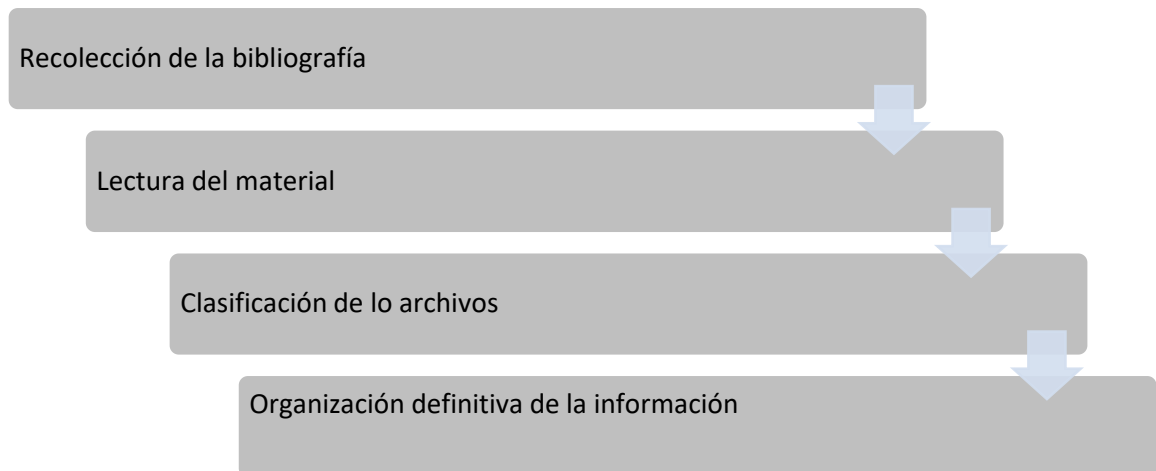


Figura 1. Metodología del estado del arte



### 3 ELECTROPULIDO

La aplicación del acero en la vida cotidiana puede tener diversos papeles, en construcción de puentes, edificios, industria automotriz, transporte de hidrocarburos, etc., sin embargo, la principal desventaja del acero como material de fabricación es su propensión a oxidarse especialmente cuando está en contacto con la atmósfera y/o con el agua. Los ingenieros han desarrollado a lo largo del tiempo numerosos tratamientos superficiales que eliminan o retardan este fenómeno natural.

En la práctica estos tratamientos superficiales lo que procuran es recubrir la superficie de la pieza con una capa de material protector y esto impide o retarda la corrosión, dentro de los tratamientos superficiales más habituales se tienen:

- Cromado: es la deposición de iones metálicos de cromo mediante una corriente eléctrica desde un ánodo a un cátodo en medio de un electrolito conformado principalmente por sales metálicas, este cromado se deposita sobre toda la superficie del objeto que puede ser metal o plástico.
- Galvanizado: es el proceso electroquímico por medio del cual se protege una superficie metálica cubriéndola con otro metal y que en la mayoría de los casos es zinc sobre hierro o acero.
- Niquelado: reside en la aplicación de una fina capa de níquel sobre la superficie del objeto a proteger, con esto se logra mejorar ligeramente la resistencia a la corrosión.
- Pavonado: es la adición de una capa superficial de magnetita al acero para reducir la corrosión y mejorar la presentación de la pieza, existen dos tipos de pavonado el ácido y el alcalino siendo el primero el más utilizado por su facilidad en el proceso y el corto tiempo requerido.

- Pintura: es un recubrimiento aplicado sobre cualquier tipo de metal que protege y retarda la corrosión.

El proceso de electropulido puede clasificarse dentro de los procesos electroquímicos y es utilizado para dar un acabado superficial excelente, y consiste básicamente en disolver electrolíticamente la superficie de la pieza controlada, con esto se reduce drásticamente la rugosidad de la pieza y así mismo se reduce la adherencia de la superficie a partículas externas. Cuando una pieza en acero inoxidable requiere condiciones especiales de resistencia a la corrosión y adicionalmente requiere una superficie lisa donde difícilmente se adhiera suciedad o residuos el proceso de electropulido es especialmente recomendado.

### 3.1 Electropulido

El proceso de electropulido es una electrólisis controlada que se realiza dentro de un recipiente o cuba, el cual contiene una solución electrolítica, un cátodo, un ánodo y una fuente de corriente continua. En este proceso la pieza se comporta como ánodo y por lo tanto cede electrones, en otras palabras, el material de la superficie de la pieza se disuelve con el paso de la corriente eléctrica. La rugosidad superficial de la pieza está conformada por una serie de irregularidades y crestas sitio este donde la corriente eléctrica tiene mayor densidad, y en esas crestas ocurre una mayor disolución del material “alisando” o puliendo dicha superficie. El resultado es una superficie ondulada suave casi plana, con un aspecto brillante en lugares donde mecánicamente es imposible de acceder, esta última característica hace que sea muy empleado en la industria alimenticia por sus muy buenas condiciones sanitarias, igualmente son utilizados en piezas de geometrías muy complejas donde otros procesos mecánicos no son posibles.

Este proceso se basa en el principio del electrolisis, que se da por un flujo de corriente y una solución fundamentalmente de ácido sulfúrico y ácido ortofosfórico como un electrolito. El tiempo de tratamiento puede variar 2 y 20 minutos.

Por otra parte, una instalación típica de electropulido no difiere mucho de la de galvanizado, consiste en una fuente de alimentación que transforma la corriente alterna (AC) en corriente continua (DC), y baja el voltaje, el depósito generalmente es en plástico, sin embargo, también son utilizados depósitos con recubrimiento en plomo que contienen el electrolito. En el interior del depósito el polo negativo de la fuente se conecta a las placas catódicas de plomo o acero inoxidable, mientras que la pieza a electropulir es fijada a una rejilla de cobre o bronce que están conectadas al polo positivo convirtiéndose de esta manera en el ánodo. Las terminales tanto positivas como negativas quedan sumergidas dentro del electrolito y configuran un circuito eléctrico cerrado como se ve en la figura 2.

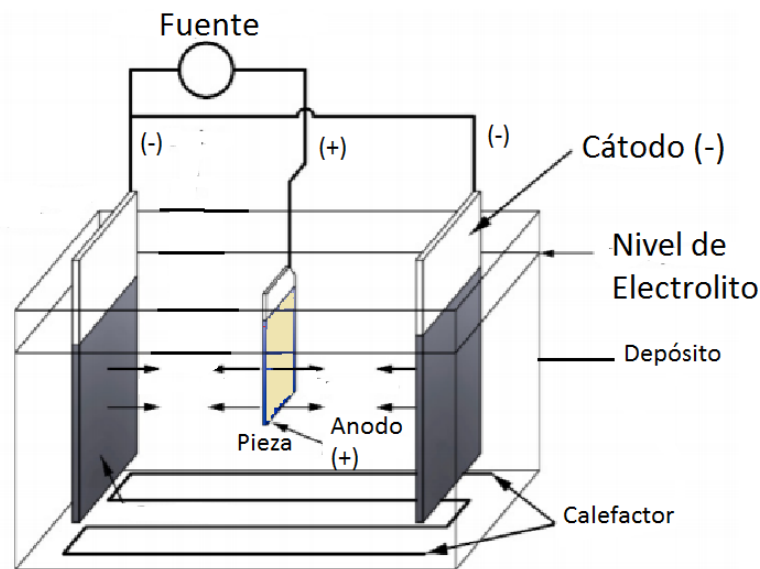


Figura 2. Instalación típica de electropulido, la pieza a electropulir se fija al soporte y este es conectado al polo positivo de la fuente de corriente continua.

[http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-Files/PDF/Euro\\_Inox/Electropolishing\\_SP.pdf](http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-Files/PDF/Euro_Inox/Electropolishing_SP.pdf)

Cuando se energiza la fuente el electrolito actúa como conductor y la pieza que en este caso es el ánodo cede iones (perdida de material), la mayor parte de estos permanece en el electrolito, y los restantes viajan hacia el cátodo depositándose sobre su superficie. La relación entre la corriente aplicada, el tiempo de exposición y la eficiencia del electrolito es proporcional al material eliminado de la pieza, por esto dichas variables deben ser controladas para mantener las dimensiones dentro de la especificación.

### 3.2 Proceso:

- los buenos resultados del electropulido dependen en gran medida de una adecuada preparación del acero, esto es, limpiar y desengrasar la superficie, para ello se utilizan productos alcalinos y/o disolventes que dejan la superficie libre de grasa y suciedad, posteriormente se debe enjuagar la pieza con el propósito de eliminar estos productos de la superficie disolviéndolos.
- Electropulido: en este paso el metal es disuelto por el proceso galvánico y algunos componentes del acero inoxidable son disueltos con mayor facilidad, tal es el caso del hierro y el níquel, por otro lado el cromo se fija en la superficie y acelera la pasivación y el resultado es la eliminación de las crestas más elevadas de la microrrugosidad obteniéndose una superficie suavizada. El electrolito típico está compuesto por una mezcla de ácido sulfúrico y ácido fosfórico, dentro del cual circula una corriente con densidades que varían desde 5 hasta 30 A por decímetro cuadrado, con temperaturas de la solución entre 40° y 75° C el tiempo de esta parte del proceso varía de 2 a 20 minutos. Las neutralizaciones de los ácidos del electrolito se hacen con soda caústica dentro de un tanque, estas soluciones del proceso son viscosas por lo que se adhieren a la superficie y deben ser retiradas de la pieza de lo contrario pueden dar origen a defectos de las superficies.

- Tratamiento posterior: en el proceso de electropulido ocurren reacciones químicas secundarias las cuales producen fosfatos y sulfatos, que difícilmente son eliminados con la neutralización, por esta razón debe hacerse un tratamiento posterior con ácido nítrico que disuelve estos productos químicos secundarios, de esta manera se asegura una superficie consistente e higiénica para usos posteriores. Inmediatamente después se hace un lavado con agua caliente que tiene el propósito de elevar la temperatura de la pieza para y lograr un secado casi instantáneo al momento de desmontar la pieza de la rejilla.

### 3.3 Rugosidades obtenidas

una forma efectiva de obtener buenos acabados superficiales es el electropulido ya que se obtienen rugosidades hasta de  $R_a < 0.2 \mu\text{m}$ . El parámetro de rugosidad  $R_a$  está definido como la media aritmética de los valores absolutos de las coordenadas de los puntos del perfil de rugosidad en relación a la línea media dentro de la longitud de medición<sup>1</sup>, ver figura 3.

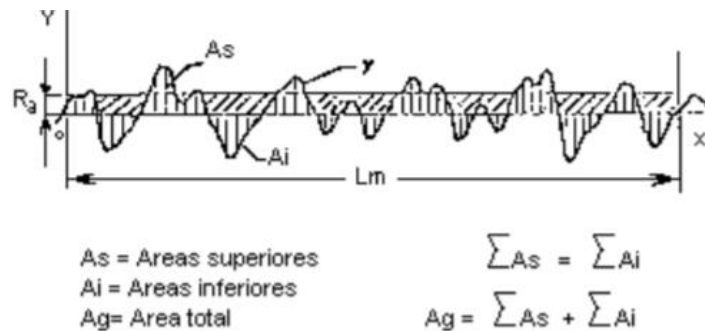


Figura 3. Parámetro de rugosidad  $R_a$

Los puntos más altos llamados picos y los puntos más bajos llamados valles reciben una mayor densidad de corriente y esto hace que estas zonas se disuelvan con mayor rapidez y el resultado es una superficie más suave. Los electrolitos

<sup>1</sup> <http://www3.fi.mdp.edu.ar/tecnologia/archivos/TecFab/10.pdf>

empleados para el electropulido de acero inoxidable son ácido fosfórico y ácido sulfúrico que varían su concentración, ocasionalmente se utilizan aditivos que mejoran ciertas características de la pieza como por ejemplo el ácido crómico que aumenta el brillo. Los resultados en acero AISI 316L modificando la concentración de los electrolitos ver tabla 1, en el primer caso ácido sulfúrico y ácido fosfórico (35% y 45%), en el segundo igual pero con un agregado de ácido crómico al 3% con el fin de mejorar el brillo de la pieza tratada y un tercer caso donde las concentraciones de ácido sulfúrico y fosfórico fueron de 15% y 63%. Adicionalmente a la variación de las concentraciones del electrolito, también se analizaron la influencia de la densidad de corriente (J), el tiempo de duración del electropulido (t), la temperatura del electrolito (T), la posición o separación de los electrodos (P) y la rugosidad inicial de las muestras rectangulares que en total fueron 768 con espesor de 2 mm y su composición AISI 316L (ISO 4954, X2CrNiMo17133E, C-0,03%, Si-0,50%, Mn-1,38%, Ni-10,08%, Cr-16,93%, Mo-2,05%, N-0,05%, S-0,01%, P0,034%)

<b>Electrolito</b>	<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>[%]</b>	<b>H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>[%]</b>	<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>[%]</b>	<b>H<sub>2</sub>O[%]</b>
E1	35	45	0	20
E2	35	45	3	17
E3	15	63	0	20

Tabla 1. Concentración de los electrolitos

En el estudio realizado se concluye que la adición de ácido crómico mejora el brillo y la rugosidad de las superficies tratadas, por otra parte la separación entre los electrodos no incide significativamente en el brillo, en lo que respecta a la temperatura los mejores resultados se obtuvieron con las temperaturas más altas, pero sus diferencias no fueron significativas. Se evidenció que la densidad de corriente si afecta el resultado del brillo a menor densidad menor brillo (10 A / dm<sup>2</sup>), sin embargo, se estabiliza el resultado a 29 A / dm<sup>2</sup>. El máximo brillo se logró con

14 minutos de tratamiento, con tiempos superiores el brillo no mejoro y en algunos casos empeoró. Finalmente, el estudio muestra que los parámetros que más inciden en el electropulido son la densidad de corriente y el tiempo<sup>2</sup>.

Con el electropulido se metal de una pieza por medio de la aplicación de una corriente eléctrica manteniendo la pieza sumergida en un electrolito de composición específica. Este proceso es el inverso a la galvanización. Puesto que, en el proceso de galvanizado, los iones metálicos se depositan de la solución sobre la pieza. Y en el electropulido, la pieza se desgasta, añadiendo iones del metal a la solución. Esta instalación típica de electropulido es parecido en apariencia a una línea de galvanización. Una fuente de alimentación, que transforma la corriente CA en CC y baja el voltaje a menores tensiones. Por lo general se usa un depósito fabricado de plástico o depósitos con recubrimiento de plomo para mantener el baño químico. Una serie de placas catódicas de plomo, cobre o acero inoxidable se sumergen en el baño, conectadas al polo negativo (-) de la fuente de alimentación. Las piezas a electropulir se fijan a una rejilla hecha de titanio, cobre o bronce. La rejilla, a su vez, se conecta al polo positivo (+) de la fuente de alimentación.

### 3.4 Mecanismos de Electropulido

No existe una teoría generalmente aceptada en cuanto al mecanismo de acción del electropulido, pero ocurren ciertos fenómenos anódicos que caracterizan al electropulido, dichos fenómenos son:

- La polarización de los electrodos metálicos conduce, en ciertas condiciones, a la pasivación del ánodo, que desaparece agitando la solución o al interrumpir la corriente polarizante.

---

<sup>2</sup> E.m. Beamund, P. J. Nuñez, E. Garcia-Plaza, Impact of electrolyte oncentration on surface gloss in electropolished stainless Steel. (2017)

- Bajo ciertas condiciones, estos fenómenos inestables de la pasivación están relacionados con una pulsación de la corriente, por ejemplo, un cambio espontáneo, periódico, más o menos rápido y marcado en la intensidad de la corriente.
- Los fenómenos de la pasivación del ánodo y la pulsación de la corriente están reflejados en una curva intensidad-potencial.
- La pulsación de la corriente va asociada a cambios visualmente observables en la superficie del ánodo.
- A cierta densidad de corriente, característica del metal y del electrolito, ocurre la transformación de la superficie del ánodo de mate a brillante y lisa, esta transformación va asociada, en ciertos casos por una pulsación en la intensidad de la corriente.

#### 1.4.1 relación entre potencial anódico y densidad de corriente

Si es aplicado un incremento de potencial a la celda, y la celda permite alcanzar un equilibrio en cada cambio de voltaje, entonces el potencial del ánodo, el potencial del cátodo, y el voltaje de la celda se relacionaría aproximadamente con la densidad de corriente como se muestra en la figura 4.



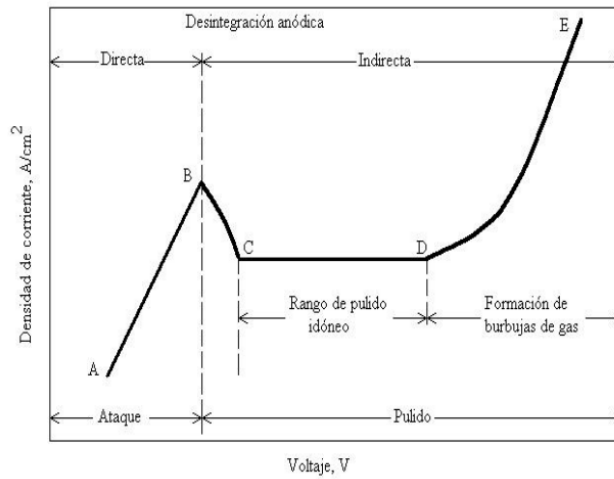


Figura 4. Curva de la densidad de corriente en función del voltaje.

Los cambios en la condición de la superficie durante el tratamiento pueden relacionarse para secciones específicas de las curvas, correspondientes a cuatro fases principales. A lo largo de AB la probeta es atacada; en BC ocurre inestabilidad, y oscilaciones periódicas de densidades de corriente; a lo largo de CD ocurre el pulido con densidad de corriente constante (comúnmente llamada límite de densidad de corriente), la calidad del pulido se incrementa con un aumento del voltaje hasta D; a lo largo de DE ocurre evolución de gas y la superficie se vuelve rugosa.

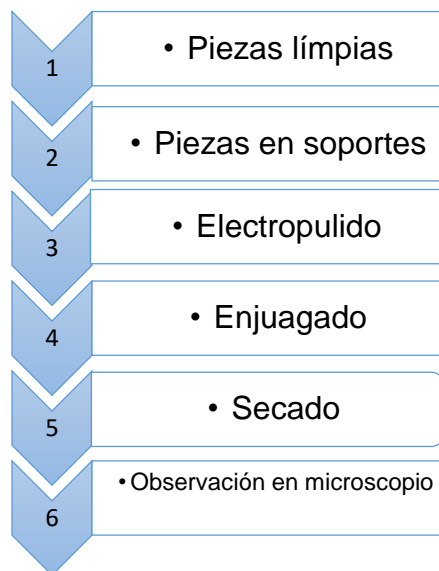
## 1. Procedimientos para el electropulido

Para efectuar un electropulido a cualquier material metálico se deben efectuar una serie de operaciones, como se muestra en la Figura 5 y dependen del tipo de aplicación. La limpieza es necesaria antes del electropulido para quitar la suciedad de la superficie, como óxidos, grasa, aceite, huellas dactilares, manchas de los compuestos empleados en la embutición o en troquelado y manchas excesivas o escamas producidas por calentamiento. Todas las partículas sólidas deben ser quitadas de la superficie, de lo contrario actuarán como aislantes dejando zonas de pulido heterogéneo en la superficie como resultado del electropulido.

Figura 5. Procedimiento para el electropulido.

## 2. Metales para electropulido

El éxito de un electropulido, en cuanto a su apariencia y costo, requiere metales con una estructura uniforme de grano fino, libre de grietas, inclusiones no metálicas y otras materias no homogéneas. Las aleaciones de fases múltiples no se electropulen bien en baños comerciales. Las fases ricas en silicio, plomo o fósforo ocasionan dificultades. En la mayoría de los metales laminados es difícil lograr un



buen electropulido si hay una reducción en cualquiera de las operaciones, un recocido inapropiado entre pasadas en frío, un decapado excesivo, pasadas de

laminación con un alto porcentaje de trabajo en frío, descarbonación de la superficie y esmerilado o laminado sobre rodillos sucios. Los cortes profundos hechos en el torno, fresadora, conformadora o esmeril son perjudiciales para un buen electropulido, como también lo es la limpieza por chorro de arena o de granalla en cualquier forma. Aceros Inoxidables: La mayoría de los aceros inoxidables de uso más común, de las series 300 y 400, pueden ser electropulidos. Acero: Se obtienen resultados satisfactorios conformadora o esmeril son perjudiciales para un buen electropulido, como también lo es la limpieza por chorro de arena o de granalla en cualquier forma. Aceros Inoxidables: La mayoría de los aceros inoxidables de uso más común, de las series 300 y 400, pueden ser electropulidos. Acero: Se obtienen resultados satisfactorios del electropulido en aceros ordinarios al carbono tales como: AISI 1010, 1020, 1040 y 1080; Además aceros de baja aleación: 4130, 4030, 4340 y 4140. Aluminio: La mayoría de las aleaciones laminadas de aluminio y varias de las fundidas en arena y en moldes metálicos pueden ser electropulidas. Cobre: El cobre y las aleaciones de cobre pueden ser electropulidas satisfactoriamente.

### 3.5 Ataque del electrolítico

Aunque puede ser obtenida cierta información de una probeta pulida, la microestructura es usualmente visible únicamente después del ataque. Solamente características que presentan una diferencia significativa en reflectividad (10 % o más) pueden ser observadas sin ataque. En muchos casos, una probeta pulida no puede presentar las microestructuras porque la luz incidente es reflejada uniformemente, ya que pequeñas diferencias en reflectividad no pueden ser reconocidas por el ojo humano, se deben utilizar otros medios (microscopios, etc.). Inmediatamente después que la operación del electropulido se ha completado, el ataque electrolítico puede ser realizado, en algunas aplicaciones reduciendo el voltaje a aproximadamente una décima parte del potencial requerido para el electropulido y entonces se continua con la electrolisis por unos pocos segundos, hasta revelar la microestructura del material.

(Shuo-Jen, Lee Jian-Jang Lai, 2003) En el trabajo “Los efectos de los parámetros del proceso de electropulido (EP) sobre la resistencia a la corrosión del acero inoxidable 316L” emplean diversos métodos de prueba para verificar los resultados de la modificación de la superficie, en primer lugar el método de polarización lineal es apropiado para estudiar corrosión uniforme dada su alta precisión. El acero 316L por su contenido de Cr de 18%, su capa exterior tiene una buena resistencia a la corrosión, sin embargo, es la corrosión localizada la que originan problemas, una forma de corrosión localizada es la intergranular y se presenta cuando la capa exterior de oxidación se deteriora y el límite de grano se expone al ácido. Un segundo método utilizado por los autores es prueba de repasivación potencioquinética electroquímica (EPR), con esta se determina la resistencia a la corrosión después del tratamiento térmico, también se emplea para estudiar el cambio en corrosión localizada después de la fusión de la superficie con laser. Las composiciones metalúrgicas y el grosor de la película pasiva después del proceso se analizaron por método electroquímico (EPR), así mismo, se empleó análisis de espectroscopía fotoelectrónica de rayos X (XPS) y espectroscopía electrónica de Auger (AES).

El material de prueba fue acero 316L de (70 x 50 x 1) mm, preparado con lijas # 200, 400 y 600 para eliminar rasguños y capa deformada de procesos anteriores, en cuanto a la rugosidad se midieron valores de 0.1 y 1.1  $\mu\text{m}$  de  $R_a$   $R_{\text{max}}$  respectivamente. El electrolito conformado por ácido fosfórico, ácido sulfúrico, glicerina y agua destilada, la temperatura se controló en 60°C. La separación entre electrodos fue una de las variables (A) de control y el tiempo de proceso fue la variable (B). El experimento corresponde a un factorial completo de dos variables (A y B) y para tres niveles.

Los resultados logrados son en primer lugar que la mayor separación entre los electrodos permite que el gas de hidrógeno se escape resultando en una mejor uniformidad del electrolito y por ende una rugosidad mejor en la superficie, en el experimento se trabajaron separaciones de 3, 5 y 7 mm, obteniéndose los mejores

resultados a los 5 mm, 7 mm y 3 mm respectivamente. Por otro lado en lo que concierne al tiempo a los 5 minutos de pulido se dieron los mejores resultados logrando una rugosidad de (0.02  $\mu\text{m}$ ) el alargar el tiempo no cambia sustancialmente este resultado, sin embargo, se presentaron algunos redondeos en los bordes lo que podría comprometer las dimensiones de las piezas. En lo que atañe al comportamiento de la corrosión uniforme después del electropulido se evidencio un mejor comportamiento del 60 al 80% ya que se pasó 0.0955 mmpa a 0.0399 mmpa, así mismo, la corrosión localizada mejoro su comportamiento (85 – 91%) esto se explica en la formación de un capa más uniforme y compacta de película pasiva lo que redujo significativamente la corrosión intergranular. Importante ver que la relación entre los componentes principales de la película de óxido antes del EP entre  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  paso de 0.97 a 2.58 después de EP por lo que la corrosión uniforme mejoró sustancialmente.

(Chi-Cheng Linb Chi-ChangHu, 2008) El trabajo “Pulido electrolítico del acero inoxidable 304: control de rugosidad de la superficie mediante estrategias de diseño experimental y un modelo de electropulido resumido” presenta un diseño factorial fraccional para establecer los parámetros claves que afectan el grado de rugosidad en un acero 304SS: el primero es la relación de volumen entre el ácido fosfórico y ácido sulfúrico, el segundo es el contenido de volumen de glicerol, el tercer parámetro es la temperatura de la solución, el cuarto la densidad de corriente y el quinto es el tiempo de electropulido. Después de realizado el experimento y a partir de un análisis estadístico juicioso se establece que la temperatura, tiempo y las interacciones entre el contenido de glicerol y la temperatura y la temperatura y la densidad de corriente muestran efectos estadísticamente significativos en el valor de la rugosidad (Ra). Por otro lado los autores a partir del análisis de varianza y análisis de regresión proponen un modelo polinomial ajustado que explica cuantitativamente los efectos de los parámetros del electropulido:

$$Y = 16.98 + XB + 2.44XC + 1057XE - 2.6XBXC - 0.96XBXD - 1.97XCXD$$

En donde:

A : relación de volumen entre el ácido fosfórico y ácido sulfúrico

B : contenido de volumen de glicerol

C : temperatura de la solución

D : densidad de corriente

E : tiempo de electropulido

(EM Beamud ,PJ Núñez ,E. García-Plaza ,D. Rodríguez, 2013)En este trabajo se describe la evaluación de tres electrolitos industriales utilizados en electropulido los cuales son generalmente ácido fosfórico, ácido sulfúrico y ocasionalmente aditivos como el ácido crómico, los resultados obtenidos se presentan en términos de la rugosidad. En este estudio se concluye que la posición de los electrodos, ni la rugosidad inicial de las muestras inciden significativamente en la variación del pulido, en donde esta variación es medida de acuerdo con la ecuación 1.

$$\Delta Ra = \frac{R^0a - R^fa}{R^0a} \quad \text{Ec.1}$$

En donde:

$\Delta Ra$  = Variación de la rugosidad en (%)

$R^0a$  = Rugosidad inicial

$R^fa$  = Rugosidad final

Por otro lado el estudio también reveló que la temperatura no influye significativamente en el rendimiento del electropulido dado que el mismo rango de rugosidad (Ra) se obtuvieron independientemente del tiempo y densidad de corriente, sin embargo, el mejor comportamiento del proceso en términos de conductividad electrónica, reducción de costos de energía y producción de vapores tóxicos se logró con temperaturas cercanas a 35°C.

En los parámetros de tiempo y densidad de corriente se encontró que los mejores resultados se dieron con un tiempo de 25 minutos de electropulido y una densidad de corriente de 48 A/dm<sup>2</sup>. Prolongar el tiempo de electropulido no mejora la rugosidad, y por el contrario se puede perder material comprometiendo la geometría y especificaciones de la pieza.

(EM Beamud, PJ Núñez, E. García-Plaza ,D. Rodríguez, 2017) Describen el trabajo de evaluación de tres electrolitos industriales los cuales son concentraciones variables de ácido fosfórico, ácido sulfúrico y ocasionalmente aditivos como el ácido crómico, esta evaluación se realizó en términos del brillo obtenido en la superficie del acero inoxidable variando las condiciones de: densidad de corriente, tiempo del electropulido, temperatura del baño, posición de los electrodos y rugosidad inicial de la superficie. En el estudio realizado se concluyó que la adición de ácido crómico mejora el brillo y la rugosidad de las superficies tratadas, por otra parte la separación entre los electrodos no incide significativamente en el brillo, en lo que respecta a la temperatura los mejores resultados se obtuvieron con las temperaturas más altas, pero sus diferencias no fueron significativas. Se evidenció que la densidad de corriente si afecta el resultado del brillo a menor densidad menor brillo (10 A / dm<sup>2</sup>), sin embargo, se estabiliza el resultado a 29 A / dm<sup>2</sup>. El máximo brillo se logró con 14 minutos de tratamiento, con tiempos superiores el brillo no mejoro y en algunos casos empeoró. Finalmente, el estudio muestra que los parámetros que más inciden en el electropulido son la densidad de corriente y el tiempo.

(Cheng Ma En-Hou Han, 2018) Este trabajo de investigación presenta el efecto del cambio en la composición de la superficie y el estado superficial por diferentes procesos de pulido sobre la corrosión del acero inoxidable 308L (metal de soldadura) en agua a alta temperatura. El trabajo se desarrolló contrastando la resistencia a la corrosión de muestras electropulidas con la de las muestras pulidas

mecánicamente en suspensión de sílice coloidal de 40 nm. Frecuentemente el acero inoxidable austenítico es utilizado en aplicaciones que requieran agua a alta presión y altas temperaturas por su buena resistencia a la corrosión junto con este acero se emplea también el 308L que es el metal de soldadura para unir con aceros de baja aleación. Una de las principales preocupaciones en materiales estructurales es el craqueo asistido ambientalmente (EAC) en agua a alta temperatura y precisamente este fenómeno de degradación inicia con la ruptura de la película de óxido por lo que la composición de la escala de óxido formada en el acero es determinante en el fenómeno de EAC. Uno de los factores más influyentes es el estado superficial ya que incide en el comportamiento de la corrosión. La investigación arrojó que las probetas electropulidas tenían una mayor tasa de corrosión esto debido en parte la superficie pulida con suspensión de sílice coloidal es más lisa comparada con la superficie electropulida que presentaba puntas afiladas y picaduras (ver figura 6), en otras palabras, se tiene que hay mayor área de exposición en la superficie

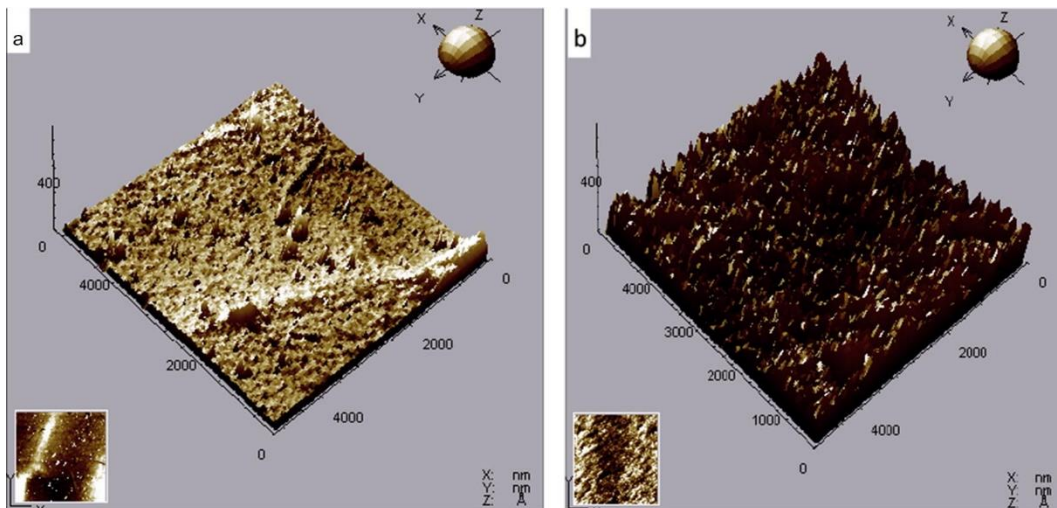


Figura 6. Imágenes de la morfología tridimensional a) de CPS y b) ESP, obtenidas con microscopio de fuerza atómica

electropulida que en la pulida mecánicamente. Por otro lado el proceso de electropulido facilitó la formación de una capa enriquecida con Cr consistente en hidróxido de cromo pero con un mayor óxido de Fe sin enriquecimiento de Cr. La diferencia de las muestras en la microestructura se asoció con los procesos anódicos



y catódico del electropulido, durante este proceso la disolución de los elementos de aleación y la evolución del oxígeno se produce en el ánodo (superficie a pulir) mientras que la evolución del hidrógeno ocurre en el cátodo. Probablemente el enriquecimiento de Cr en la superficie se puede explicar por la disolución selectiva de Fe y Ni en el electrolito.

## CONCLUSIONES

Un proceso de investigación documental logra establecer quienes han intervenido en el área específica de conocimiento, igualmente permite establecer claramente cuáles han sido las herramientas para proponer soluciones, en el caso particular diferentes concentraciones de electrolitos, densidad de corriente, temperaturas de electrolito, separación de los electrodos, rugosidad inicial, conocer todos estas variables permiten entender cómo se puede optimizar el proceso de electropulido.

El proceso de electropulido mejora considerablemente la resistencia a la corrosión en los aceros inoxidable entre un 60 y 80%, ya que se forma una capa más uniforme y compacta de película pasiva lo que reduce también la corrosión intergranular.

Importante considerar el tiempo de electropulido ya que si se alarga más allá del óptimo puede comprometer dimensional y geoméricamente las piezas y en muchos casos puede perder funcionalidad e intercambiabilidad.

La adición de algunos aditivos como el ácido crómico mejora la condición de rugosidad y brillo de las superficies tratadas.

## BIBLIOGRAFÍA

ASTM B Standard Specification for Passivation of Stainless Steels Using Electropolishing [8] ISO 15730: 2000 Metallic and other inorganic coatings Electropolishing as a means of smoothing and passivating stainless steel

Cheng Ma, En-Hou Han, Qunjia Peng, Wei Ke (2018). Effect of polishing process on corrosion behavior of 308L stainless Steel in high temperature water

Chi-Cheng Linb Chi-ChangHu, (2008). Electropolishing of 304 stainless steel: Surface roughness control using experimental design strategies and a summarized electropolishing model,

CROOKES, Roger, (2007). Decapado y Pasivado del acero inoxidable, Luxemburgo: Euro Inox, Segunda edición (Series de Materiales y Aplicaciones, Volumen 4) – <http://www.euro-inox.org/pdf/map/Passivating Pickling EN.pdf>

Eagleson, Mary (1994), Concise encyclopedia chemistry (revised edición), Walter de Gruyter, p. 834, ISBN 9783110114515.

GILI GUSTAVO, ELECTROPULIDO ANONIZADO DE METALES, 1972, Barcelona, Traducido por FRANCISCO PALAU SIURANA

MOHAN, S., KANAGARAJ, D., VIJAYALAKSHMI, S., RENGANATHAN, N. G., (2001) Electropolishing of Stainless Steel a Review, Trans IMF 79, No.4,

Zia ur Rahman, K.M. Deen, Lawrence Cano, Waseem Haider, (2017). The effects of parametric changes in electropolishing process on surface properties of 316L stainless Steel.