

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y TEXTIL**



**“ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL PARA EL PULIDO  
ELECTROLÍTICO DEL ACERO”**

**INFORME DE SUFICIENCIA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO QUÍMICO**

**POR LA MODALIDAD DE ACTUALIZACIÓN DE CONOCIMIENTOS**

**PRESENTADO POR:**

**ALBERT OMAR, MURILLO GARCIA**

**LIMA – PERÚ  
2014**

## **DEDICATORIA**

A mis padres y hermanos, quienes con intuición y generosidad me apoyaron siempre. A mis amigos, fuente constante de motivación. A mis profesores y asesores porque ellos sembraron la semilla y fertilizaron mi inquietud de conocer y me facilitaron las herramientas para realizar las pruebas experimentales del presente informe

## RESUMEN

En la industria se obtiene los mejores resultados cuando en la superficie se minimiza la corrosión de los aceros, principalmente la corrosión uniforme y la localizada para esto el metal debe ser homogénea y libre de defectos superficiales. Esto se logra con el electro pulido del acero inoxidable. Además es necesaria una tecnología que facilite la limpieza especialmente en superficies de gran magnitud y de forma irregular que elimine las rebabas, imperfecciones de la superficie y rayas de soldadura que no se puede lograr con el pulido mecánico; para esto utilizamos el electro pulido que tiene como mayor rasgo identificable obtener un material con una superficie brillante.

Dada la necesidad de implementar un procedimiento ágil y eficaz en el presente trabajo se tratará de evaluar las condiciones óptimas para el desarrollo en lo posterior del proceso de electro pulido del acero como metal más utilizado en las diversas industrias.

En este proyecto se realiza el electro pulido del acero inoxidable, el cual actúa de ánodo y como cátodo se han dispuestos dos placas de plomo, todos ellos conectados a una Rectificadora que proveerá de corriente directa al sistema.

El procedimiento a evaluar se lleva a cabo sumergiendo los ánodos de dimensiones predeterminadas en un baño electrolítico conteniendo ácido sulfúrico, ácido fosfórico y ácido crómico disueltos en agua destilada.

Se realiza variaciones de temperatura de la solución electrolítica, hasta encontrar las condiciones adecuadas, para caracterizar dichas condiciones se realiza análisis superficial mediante microscopio óptico y el microscopio electrónico de barrido (SEM) para observar la rugosidad de la pieza de trabajo. Además, se realiza variaciones en la densidad de corriente y el voltaje para lograr el mejor electro pulido.

El electro pulido confiere al material un mejor brillo superficial, para caracterizarlo se realiza pruebas de reflectancia mediante espectrofotometría.

Complementariamente se realiza ensayos de polarización lineal para cuantificar el incremento de resistencia a la corrosión logrado.

## INDICE

---

	Pagina
I	INTRODUCCIÓN..... 9
1.1	Objetivo del estudio..... 10
1.2	Alcance ..... 11
II	DESARROLLO DE CONCEPTOS Y TÉCNICAS ..... 12
2.1	Definición de electropulido ..... 12
2.2	Primeros trabajos en este campo ..... 13
2.2.1	El estudio de Jacquet ..... 15
2.3	Principios de corrosión electroquímica ..... 16
2.4	Fenómeno de la pasivación anódica ..... 18
2.5	Formación de la capa anódica. .... 20
2.5.1	Composición de la capa anódica ..... 21
2.6	Perfil de una superficie rugosidad ..... 22
2.7	Mecanismo del electropulido ..... 22
2.8	Factores de operación..... 23
2.8.1	Densidad de corriente ..... 24
2.8.2	Densidad del electrolito ..... 24
2.8.3	Temperatura del baño ..... 25
2.8.4	Tiempo de exposición ..... 27
2.9	Aplicaciones del electropulido ..... 27
2.10	Ventajas y limitaciones ..... 31
2.11	Condiciones que afectan el electro pulido ..... 33
2.12	Fallas y remedios durante el proceso..... 33
III	PROCESO DEL ELECTROPULIDO DEL ACERO..... 35
3.1	Trabajo experimental y pruebas ..... 35
3.1.1	Equipo experimental para el electropulido ..... 35
3.1.2	Control de la temperatura y densidad del electrolito. .... 38
3.1.3	Desengrase electrolítico. .... 39

3.1.4	Selección del electrolito .....	40
3.1.5	Materiales utilizados.....	41
3.1.6	Estudio de las variables del proceso. Efecto sobre la rugosidad y brillo de la superficie.....	41
3.1.7	Densidad de corriente .....	43
3.1.8	Tiempo de exposición .....	44
3.2	Resultados .....	44
3.2.1	Análisis metalográfico de las piezas.....	44
3.2.2	Micrografías obtenidas con microscopio óptico .....	46
3.2.3	Micrografías obtenidas con microscopio de barrido electrónico (SEM).....	48
3.2.4	Análisis de reflectancia mediante espectrofoimetría.....	51
3.2.5	Ensayos de polarización lineal .....	51
3.3	Discusión de resultados.....	60
IV	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	62
4.1	Conclusiones .....	62
4.2	Recomendaciones .....	63
V	BIBLIOGRAFÍA.....	64

## TABLAS

---

### Página

Tabla 1: Composición del electrolito para los diferentes tipos del electropulido..	26
Tabla 2: Los efectos de los parámetros del proceso del electropulido sobre la resistencia a la corrosión del acero.....	34
Tabla 3: Resultados obtenidos con las diferentes condiciones de trabajo.....	45
Tabla 4: Metalografías obtenidas con el microscopio óptico .....	47
Tabla 5: Metalografías obtenidas con el microscopio de barrido electrónico .....	49
Tabla 6: Ensayos de polarización Lineal. ....	57

## FIGURAS

---

	<b>Pagina</b>
Figura 1: Relación entre la Densidad de Corriente Anódica y el Potencial en el Electropulido .....	16
Figura 2: Perfil de rugosidad.....	22
Figura 3: Aplicaciones del electropulido: Tuberías .....	28
Figura 4: Aplicaciones del electropulido: Industria Farmacéutica.....	29
Figura 5: Aplicaciones del electropulido: Industria alimentaria .....	30
Figura 6: Rectificador utilizado para el electropulido del acero. ....	36
Figura 7: Tanque para el pulido electrolítico del acero. ....	36
Figura 8: Ubicación del calentador en el tanque electropulidor.....	37
Figura 9: Control de temperatura en el baño electrolítico. ....	38
Figura 10: Diagrama del desengrase electrolítico. ....	39
Figura 11: Flujograma del proceso de electropulido del acero.....	42
Figura 12: Esquema de trabajo del pulido electrolítico del Acero. ....	43
Figura 14: Fotografía del microscopio de barrido electrónico SEM .....	46
Figura 15: Pruebas de reflectancia en las diversas condiciones de trabajo .....	52
Figura 16: Mecanismo de corrosión .....	53
Figura 16: Equipo experimental en Laboratorio .....	56
Figura 17: Equipo experimental en Laboratorio -.....	56
Figura 18: Curva potencioestática, condición inicial. ....	58
Figura 19: Curva potencioestática, condición óptima. ....	59



## I INTRODUCCIÓN

El electro pulido es un proceso electroquímico para tratamiento superficial mediante el cual el metal a ser pulido actúa como ánodo en una celda electrolítica, disolviéndose con la aplicación de corriente, se forma un film polarizado en la superficie metálica bajo tratamiento, permitiendo a los iones metálicos difundir a través de dicho film. Las micro y macro proyecciones, o puntos altos de la superficie rugosa, lo mismo que zonas con rebabas, son áreas de mayor densidad de corriente que el resto de la superficie, y se disuelven a mayor velocidad, dando lugar a una superficie más lisa, nivelada y/o rebabada. Simultáneamente, y bajo condiciones controladas de intensidad de corriente y temperatura, tiene lugar un abrillantamiento de la superficie.

Aun hoy, no existe una teoría consistente del pulido electrolítico. Desde la primera de Jacquet que hacía responsable de la nivelación superficial y del pulido a una capa viscosa de tránsito entre el metal y el electrolito, que ofrece menor resistencia al paso de la corriente en los salientes que en las entrantes de la superficie, casi cada autor ha edificado sobre hipótesis más o menos originales su propia teoría. Así, según Elmore la acción nivelante se debe fundamentalmente a la difusión de los productos de disolución.

En aleaciones, como el acero inoxidable, se tiene además la ventaja adicional que, al ser el hierro un metal que se disuelve fácilmente, se incrementa el contenido de cromo y níquel en la superficie, aumentando así la resistencia a la corrosión.

En la industria se obtiene los mejores resultados cuando en la superficie se minimiza la corrosión de los aceros inoxidables principalmente la corrosión uniforme y la localizada para esto el metal debe ser homogénea y libre de defectos superficiales, dejando sobre la superficie terminada una capa de óxidos de cromo y níquel extremadamente delgada y transparente que le confiere una excelente pasividad en relación con numerosos reactivos químicos. Además de ello darle al acero una excelente pasividad con el producto que se maneja. Aparte

de ser ésta una cualidad ideal para productos alimenticios, farmacéuticos y para gases de alta pureza, es una característica indispensable para prótesis e implantes, como también incremento de vida a partes sujetas a fatiga, como resortes, gracias a la eliminación de microfisuras.

### **1.1 Objetivo del estudio**

El objetivo fundamental del presente informe es identificar las ventajas del pulido electrolítico sobre el pulido mecánico que normalmente es aplicado en la actualidad (por ejemplo, el pulido electrolítico le confiere brillo y mayor resistencia a la corrosión) con el fin de proponer el procedimiento adecuado, además de presentar la combinación óptima de las variables influyentes en el electropulido que optimizan el proceso y el resultado (brillo, resistencia a la corrosión).

Dentro de los objetivos específicos se encuentran:

- Realizar pruebas de electropulido a diferentes tipos de acero (acero 314, 316).
- Someter las muestras a análisis para determinar la variación de la rugosidad mediante análisis superficial mediante microscopio óptico y microscopio de barrido electrónico (SEM).
- Identificar un conjunto de variables como temperatura, densidad de corriente, tiempo de electropulido que confieran las características óptimas en rugosidad y apariencia adecuadas.
- Cuantificar el incremento de la resistencia a la corrosión del material a electropulir mediante ensayos de polarización lineal.

- A través de pruebas de reflectancia mediante espectrofotometría cuantificar el resultado con respecto a la muestra inicial para determinar el incremento de brillo superficial.

## **1.2 Alcance**

El alcance comprende el estudio del electropulido en el acero inoxidable realizada mediante pruebas en el Laboratorio de Físicoquímica de la Facultad de Ingeniería Química y Textil (FIQT) de la Universidad Nacional de Ingeniería, y pruebas secundarias en los laboratorios de corrosión ( laboratorio 23 FIQT) y laboratorios de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería.

## II DESARROLLO DE CONCEPTOS Y TÉCNICAS

### 2.1 Definición de electropulido

El electropulido se puede definir como el pulido de los metales por electrólisis.

El pulido Electrolítico se basa en la disolución anódica de las protuberancias de la superficie metálica, mediante la cual el metal se disuelve electrolíticamente, ion por ion, con lo que se obtiene un perfil muy llano, o lo que es igual una superficie muy regular. En el electro pulido, el metal es disuelto en una película anódica proporcionada por un electrolito alcalino o ácido y por el empleo de densidades de corriente y voltaje así como otros factores de importancia.

El proceso es exactamente el inverso a la galvanización. En un proceso de galvanizado, los iones metálicos se depositan de la solución sobre la pieza. En un proceso de electropulido, la propia pieza se desgasta, añadiendo iones del metal a la solución.

El objetivo primario es minimizar la microrugosidad, reduciendo de manera espectacular el riesgo de adhesión de suciedad o residuos, mejorando la limpieza de las superficies. El electropulido también se usa para eliminar rebabas, abrillantar y pasivar.

El proceso tiene como resultado una superficie limpia e intacta. A continuación se mencionan los posibles efectos no deseados en el tratamiento mecánico de la superficie:

- Tensiones mecánica y térmica, inclusiones de partículas y superficies rugosas.
- Efectos evitables o reversibles. La resistencia a la corrosión inherente en un tipo de acero inoxidable se aprovecha completamente.

Por estos motivos, el electropulido se ha convertido en un tratamiento habitual para el acero en las industrias en las que los requisitos de resistencia a la corrosión y limpieza son especialmente elevados. Las aplicaciones típicas se encuentran en la industria farmacéutica, bioquímica y alimentaria.

Dado que el electropulido no implica un impacto mecánico, térmico o químico, se pueden someter a dicho procedimiento a elementos pequeños y mecánicamente frágiles. El electropulido se puede aplicar a piezas de casi cualquier forma o tamaño.

Debido a estas diferencias el pulido electrolítico no es otro método para producir la apariencia de brillo que se obtiene por el pulimento ordinario, el pulido fino y el abrillantado con abrasivos

Es un método para obtener nuevas cualidades y apariencia de superficie que son notables en muchas aplicaciones.

## **2.2 Primeros trabajos en este campo**

El primer trabajo auténtico con procesos electrolíticos para afinado y abrillantado de superficies metálicas se llevó a cabo en Rusia. En 1911, En la Universidad de Moscú, se obtuvo una patente de “un procedimiento para producir un acabado y brillante en la superficie de los metales y recubrimientos galvánicos”. Un año después fue concebida una patente en Alemania para un proceso análogo.

La patente describe “un procedimiento para dar una apariencia pulida a los metales y recubrimientos galvánicos caracterizados por hecho de que la pieza de metal y objeto recubierto por una capa metálica es sumergida como ánodo en una solución, la cual tiene tal composición que cuando el metal actúa como ánodo se producen condiciones inestables de pasividad, las cuales se manifiestan por un cambio anómalo de la intensidad con incremento de potencial, estando el voltaje ajustado para dar una intensidad de corriente previamente determinada por

experiencia la cual es característica para el metal dado y la solución dada, con cuya intensidad de corriente se produce una transformación de la superficie mate en una superficie brillante”. Presta especial atención particularmente a los siguientes fenómenos que en su opinión caracterizan el proceso de pulimento electroquímico:

1.- 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.

2.- Bajo ciertas condiciones estos fenómenos inestables de la pasivación están relacionados con una pulsación de la corriente; por ejemplo un cambio espontaneo periódico más o menos rápido y marcado en la intensidad de la corriente.

3.- Los fenómenos de la pasivación del ánodo y la pulsación de la corriente están reflejados sin una forma anómala de la curva intensidad - Voltaje: dentro de un cierto intervalo un incremento en el potencial no origina cambio en la intensidad de la corriente.

4.- La pulsación de la corriente va acompañada por cambios visualmente observables de la superficie del ánodo.

5.- A cierta intensidad de la corriente característica del metal y la solución dados, ocurre la transformación de la superficie del ánodo en una superficie brillante, esta transformación va acompañada, en ciertos casos, por una pulsación de la intensidad de corriente.

La principal característica distintiva del proceso de electropulido es que está transformación de la superficie del ánodo en brillante y pulida ocurre solo en las condiciones especiales descritas anteriormente de polarización anódica del electrodo metal y solo en una solución de un electrolito ( que generalmente forma complejos con el metal dado), la presencia del cual en las citadas condiciones

especiales de polarización da lugar a una pasivación inestable del metal; como resultado de tal pasividad, se obtiene en primer lugar la curva anómala intensidad-voltaje que presenta una región en la que la intensidad no se incrementa al incrementar el potencial.

### 2.2.1 El estudio de Jacquet

La curva intensidad - potencial en el caso del electropulido del acero, que fue obtenida más tarde por Jacquet (1) figura 1 corresponde con la descripción dada anteriormente. Jacquet da la siguiente explicación del fenómeno correspondiendo a las diferentes partes de la curva intensidad - potencial.

Al principio del proceso electrolítico un aumento en el potencial está acompañado por un incremento casi proporcional en la intensidad de corriente.

La porción **AB** de la curva corresponde a la disolución normal del ánodo. La superficie del metal es gris oscuro y cualquier micro irregularidad presente en el no desaparece. El emplazamiento exacto del punto V1 depende en gran manera de la velocidad de incremento del potencial en la porción **AB** de la curva. Un insignificante incremento del potencial hacia V2 da como resultado una caída en la intensidad de corriente. A partir de este punto aun incrementando el potencial la intensidad de la corriente permanece prácticamente constante.

En el caso del pulido anódico del acero la capa de electrolito situada junto al ánodo empieza a oscurecerse. El espesor de esta capa que según Jacquet llega a 0.05 mm permanece constante sobre toda la porción CD de la curva. Se observa una suavización de las microasperezas en la superficie del ánodo. El metal adquiere un lustre brillante cuando el potencial se aproxima a V3. Un posterior aumento de la tensión lleva consigo un incremento en la intensidad de la corriente acompañada de desprendimiento de oxígeno.

Jacquet considera que el electropulido comienza a un potencial correspondiente a  $V_2$ , continua cuando el potencial se incrementa de  $V_2$  a  $V_3$  con un incremento adicional en el potencial acompañado de un incremento en la intensidad de corriente. El máximo brillo de la superficie se consigue cuando el tratamiento se efectúa a un potencial ligeramente inferior a  $V_3$ .

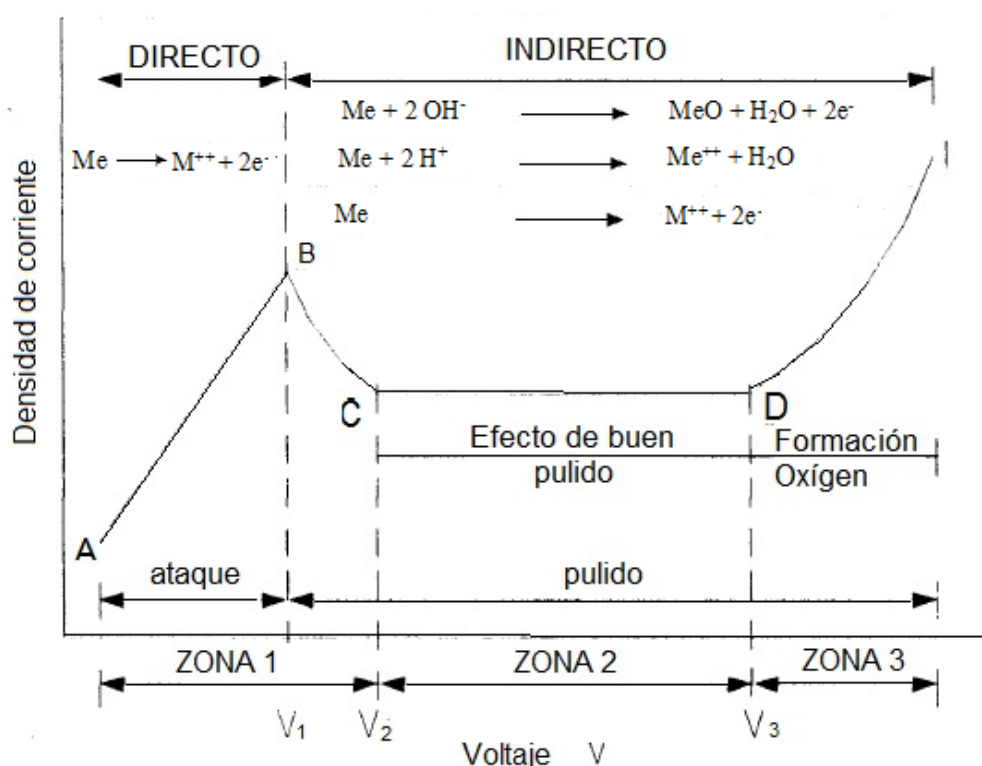


Figura 1: Relación entre la Densidad de Corriente Anódica y el Potencial en el Electropulido

### 2.3 Principios de corrosión electroquímica

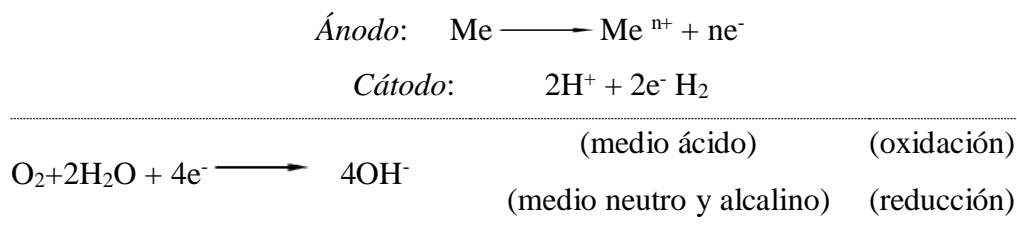
La corrosión electroquímica es un proceso espontáneo que denota siempre la existencia de una zona anódica (la que sufre la corrosión), una zona catódica y un electrolito, y es imprescindible la existencia de estos tres elementos, además de una buena unión eléctrica entre ánodos y cátodos, para que este tipo de corrosión pueda tener lugar. La corrosión más frecuente siempre es de naturaleza electroquímica y resulta de la formación sobre la superficie metálica de multitud



de zonas anódicas y catódicas; el electrolito es, en caso de no estar sumergido o enterrado el metal, el agua condensada de la atmósfera, para lo que la humedad relativa deberá ser del 70%.

El proceso de disolución de un metal en un ácido es igualmente un proceso electroquímico. La infinidad de burbujas que aparecen sobre la superficie metálica revela la existencia de infinitos cátodos, mientras que en los ánodos se va disolviendo el metal. A simple vista es imposible distinguir entre una zona anódica y una catódica, dada la naturaleza microscópica de las mismas (micropilas galvánicas). Al cambiar continuamente de posición las zonas anódicas y catódicas, llega un momento en que el metal se disuelve totalmente.

Las reacciones que tienen lugar en las zonas anódicas y catódicas son las siguientes:



La resistencia a la corrosión relativamente buena de los metales no férricos se debe a la naturaleza de las películas superficiales que estos forman en condiciones normales. Estas películas protectoras que así se forman son el resultado de la conversión de la superficie metálica en un compuesto químico que se adhiere a dicha superficie por efecto de fuerzas atómicas. Por regla general, estas películas suelen ser continuas, poco solubles, relativamente impermeables y frecuentemente invisibles.

La corrosión es un proceso de degradación y por consiguiente, se caracteriza por la disipación de energía en alguna forma

La presencia de impurezas metálicas y de óxidos y las diferencias de estructura cristalina y presencia de tensiones que a su vez dan lugar a diferencias en las tendencias de disolución no pueden evitarse con facilidad.

Estas zonas de distintas tendencias de disolución tienen diferentes potenciales electrolíticos como se demuestra experimentalmente. En las pilas galvánicas así formadas las zonas que favorecen la

Disolución metálica son los ánodos, mientras que las que fomentan la descarga de iones hidrógenos son los cátodos. La cantidad de corriente que atraviesa estas pilas es proporcional a la del metal que se disuelve. Esta acción de par constituye el mecanismo que regula la corrosión.

#### **2.4 Fenómeno de la pasivación anódica**

La posibilidad de pasivación del ánodo en el curso de los procesos de electro pulido ha sido discutida por muchos investigadores, se considera que la base del proceso del electro pulido es una pasividad anódica localizada que se presenta como resultado de la concentración de polarización. Tal pasividad se produce como resultado de la película viscosa del electrolito, que tiene una alta resistencia eléctrica llenando los microfondos de la superficie y así limita la disolución del metal en estas regiones. Las microproyecciones que no están protegidas o lo están en una menor extensión por la película anódica permanecen activas. La intensidad de corriente en estas últimas regiones es mucho mayor que la de las regiones cubiertas por la película anódica viscosa, como resultado la disolución en las primeras regiones será más rápida.

A determinadas intensidades de corriente la cantidad de disolución del ánodo empieza a ser mayor que la cantidad de difusión de los productos de la disolución en la masa del electrolito. Como resultado, se forma en la superficie del ánodo una capa de electrolito que contiene una más alta concentración de estos productos. Como consecuencia de la formación de esta capa, el potencial del ánodo pasa a ser

mayor y disminuye el grado de disolución del hierro. El potencial del ánodo alcanza valores en los cuales se hace posible la descarga de más moléculas de agua con la formación como un producto intermedio de iones de oxígeno con una sola carga. Estos últimos reaccionan con el hierro del ánodo para la formación de óxido de hierro. Este proceso ocurre primeramente a la máxima velocidad en las microproyecciones del ánodo.

Se considera posible que a cierto potencial de ánodo en el cual se observa una vigorosa evolución del oxígeno, se forme una capa de óxido en la superficie del ánodo. La formación de un revestimiento de óxido por medios electrolíticos se funda en las reacciones de electrodo entre el ánodo y el oxígeno

Hay dos tipos de películas anódicas: porosas e impermeables. Las primeras se usan contra la corrosión y encuentran extensa aplicación en la industria. Las segundas son extraordinariamente delgadas, no tienen valor como preventivas de la corrosión y se usan en condensadores electrolíticos. En las porosas el grueso no aumenta con la cantidad de electricidad que ha pasado porque hay una acción disolvente del electrolito sobre el revestimiento. El tipo de electrolito determina el carácter de la película.

La película anódica forma parte integral de la superficie del metal y fuertemente adherente. Sus propiedades dependen en gran parte del proceso de oxidación empleado. El tipo de corriente, la densidad de corriente, la naturaleza, concentración y temperatura del electrolito, la duración del proceso y la especie del metal base tienen notable influencia en las propiedades físicas de los revestimientos.

En general las películas porosas producidas a temperatura baja en un electrolito moderadamente concentrado tienen considerable resistencia a la abrasión, las películas producidas a elevadas temperaturas en electrolitos más concentrados son relativamente blandas, absorbentes y poco resistentes a la abrasión.

Hay tres electrolitos principales empleados en la producción de películas anódicas resistentes a la corrosión: el ácido sulfúrico, el ácido crómico y el ácido oxálico.

En particular los baños que contienen ácido crómico ocasionan pasividad en las superficies electropulidas. La resistencia al deslustre y a la corrosión mejora en forma notable y la superficie necesita ser activada antes del electro recubrimiento. Ejemplo el cobre y el latón deben ser activados por tratamiento catódico y / o inmersión en una solución como la cloruro amónico – ácido clorhídrico o ácido sulfúrico – oxálico, antes del niquelado brillante.

## **2.5 Formación de la capa anódica.**

W.C. Elmore (2) ha expresado diferentes puntos de vista sobre el papel que representa la película anódica en el electropulido. La función decisiva de la película anódica en el proceso electrolítico según Elmore, no es debida a diferencias en la resistencia eléctrica desde el cátodo a las microproyecciones y a los microfondos del ánodo, sino a las diferencias de velocidad en la difusión de los productos formados por el metal desde los diferentes puntos del mismo relieve a la masa del electrolito. En esta comunicación se presume que la corriente eléctrica es transportada de la solución principalmente por los iones muy móviles de hidrogeno, mientras la transferencia de iones del metal de la capa anódica a la masa de electrolito ocurre como resultado de una difusión y no de la migración de las superficies.

De acuerdo con Elmore la película anódica desempeña un doble papel en el proceso de electropulido: en primer lugar origina una fuerza contra electromotriz y en segundo lugar cuando ésta alcanza un cierto valor, la película anódica limita la intensidad de la corriente que pasa a través del baño. Elmore sugiere que bajo estas condiciones se forma la porción horizontal de la curva I-V. La intensidad de la corriente queda limitada por los procesos de la difusión. Las condiciones para la difusión desde las microproyecciones son considerablemente más favorables que

desde los microfondos y este estado favorece la disolución de las microproyecciones y un alisamiento de la superficie del metal.

### 2.5.1 Composición de la capa anódica

Prescindiendo de la naturaleza del papel desempeñado por la capa anódica en el electropulido, su composición química es de considerable interés, no se cuenta con bibliografía que explica dichas condiciones para el hierro, sin embargo de manera similar al cobre investigaciones como K. P. Batashev y E. N. Nikitin (3) han analizado la película anódica formada en el electropulido del cobre en una solución de ácido fosfórico.

K. P. Batashev y E. N. Nikitin suponen que el  $\text{CuHPO}_4$  es el primer producto que se forma con el cobre que pasa a la solución con el ácido fosfórico. Después que una solución saturada de este hidrofosfato de cobre ha sido formada en la capa anódica y después que la polarización ha alcanzado un valor suficientemente alto llega a ser posible la formación del fosfato tricuprico  $\text{Cu}_3(\text{PO}_4)_2$ .

La máxima concentración de iones de cobre ocurrirá en aquellas regiones de la capa anódica en las que las condiciones para la difusión sean más desfavorables, o sea en los microfondos. Es en estas regiones donde el fosfato tricuprico  $\text{Cu}_3(\text{PO}_4)_2$  se forma en primer lugar.

Los microproyecciones estando más favorablemente situadas en cuanto a la difusión de los productos de disolución, darán una concentración inferior de iones de cobre en las regiones adyacentes de la capa anódica. Como resultado se cubrirán con el hidrofosfato de cobre conteniendo iones hidrogeno y teniendo una conductividad más alta que el fosfato tricuprico.

Corno la formación del  $\text{Cu}_3(\text{PO}_4)_2$  continua, la resistencia del recubrimiento anódico en los microfondos aumenta. La formación del fosfato tricúprico en estas regiones continuaran hasta que todos los compuestos de hidrofosfatos de cobre hayan sido usados. Este proceso va acompañado por un incremento en potencial,

lo cual queda reflejado por la porción horizontal que limita la intensidad de corriente de la curva I-V.

El electro pulido del cobre que ocurre bajo estas condiciones es de acuerdo con Batashev y Nikitin, la consecuencia de la pasivación anódica local de los microfondos y la activación de las microproyecciones del anodo.

## 2.6 Perfil de una superficie rugosidad

Se entiende por rugosidad como las irregularidades que presenta cualquier superficie.

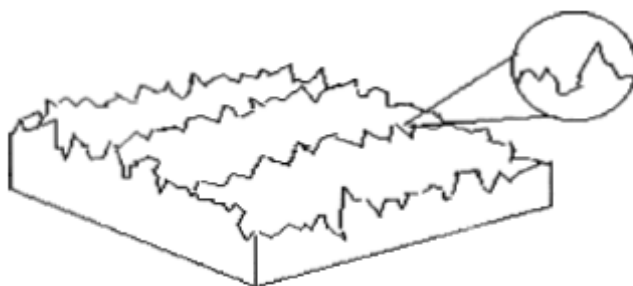


Figura 2: Perfil de rugosidad

## 2.7 Mecanismo del electropulido

Varias investigaciones sobre el mecanismo del electropulido, centran su atención sobre el alisado de la superficie del metal durante el proceso deduciendo que el brillo de la superficie es debido a la acción del alisado. La experiencia demuestra que el alisado de la superficie anódica no siempre produce un incremento del brillo. No puede deducirse tampoco que un mayor brillo no siempre signifique un alisado de las asperezas aunque el mecanismo de los procesos puede y de hecho es diferente. Puede distinguirse el proceso de alisado de la superficie sin abrillantado y el proceso de electropulido que provoca el brillo. El alisado de la superficie del ánodo durante el tratamiento. Electrolytico es debido a la diferencia de velocidad de disolución entre puntas y depresiones, efecto que puede incrementarse por el mayor enriquecimiento de la capa anódica de sales del metal. La capa anódica

tiene mayor peso específico y menor conductividad que el conjunto del electrolito. Con el ánodo cubierto por la capa anódica la resistencia al paso de la corriente hacia las microalturas puede ser mucho menor que la del paso hacia las microcavidades.

La saturación de la capa anódica con los productos formados por la disolución del ánodo determina la formación de una película de sales sobre la superficie del ánodo. Una película aislante y sin poros interrumpe la corriente; la presencia de poros origina una reducción de la densidad de la corriente y un incremento del voltaje de baño.

La corriente fluye desde el ánodo, el cual se polariza, permitiendo que los iones metálicos se difundan a través de la película del cátodo, la remoción de metal a una velocidad controlada. La cantidad de metal removido depende de la especificación del baño, la temperatura, la densidad de corriente, y en particular la aleación de ser electro pulido.

## **2.8 Factores de operación**

Para comprender mejor el proceso del electropulido interesa estudiar los potenciales de ánodo del metal que se pule, su magnitud y cambios originados por la naturaleza de los fenómenos que se producen sobre la superficie anódica. Se han estudiado el efecto que producen sobre el potencial anódico los siguientes factores:

- La densidad de corriente
- La concentración del baño
- La temperatura del electrolito
- La duración del proceso
- La especie de metal base

Los electrolitos más extensamente utilizados para el electropulido del acero están basados en el ácido ortofosfórico. Las investigaciones realizadas para el efecto de los distintos factores en el electropulido del acero afirman que existe una definida relación entre la concentración del ácido orto fosfórico y la densidad de corriente.

Cuanto mayor es la concentración de ácido fosfórico más bajos son los valores de densidad de corriente límite (tramos horizontales) y menor es el valor de la densidad con que se puede electropulir.

Cuando la concentración de ácido se reduce, los límites de potencial de ánodo entre los que se produce el tramo horizontal de la curva (densidad de corriente constante) se acercan (el tramo horizontal es más corto).

### **2.8.1 Densidad de corriente**

Como el mejor electro pulido se obtiene a una muy determinada densidad de corriente, (4). I.Layner recomienda que se controle el proceso a través del voltaje. Si se aumenta el voltaje por encima del correspondiente al desprendimiento de oxígeno, la superficie obtenida aunque brillante, resulta picada por la retención de las burbujas de oxígeno sobre el metal.

La calidad del pulido depende también de la forma de las piezas a pulir y de la superficie inicial. Las superficies paralelas al fondo del batio quedan peor pulidas que las de posición vertical incluso pueden mordentarse.

### **2.8.2 Densidad del electrolito**

De la tabla 1 se puede determinar para varios metales, los electrolitos a usar, y el acero inoxidable se pueden pulir con un electrolito que contenga ácido crómico, fosfórico, sulfúrico. La presencia del ácido crómico altera considerablemente el electro pulido, así mientras, que en un electro pulido con electrolito a base de ácido fosfórico solo se obtienen buenos resultados trabajando en las condiciones que representan el tramo horizontal de la curva de potencial anódico, si el



electrolito contiene ácido crómico se puede obtener un buen pulido trabajando entre amplios límites de densidad de corriente, de 5 a 70 A / dm<sup>2</sup> con desprendimiento de oxígeno incluido. El tiempo de pulido se reduce a 2 – 3 minutos.

### **2.8.3 Temperatura del baño**

La mayoría de las soluciones de pulido electrolítico deben ser calentadas y a la vez enfriadas durante el periodo de operación. La calefacción se logra con calentadores eléctricos usando vidrio pírex, o acero inoxidable con revestimiento de teflón.

Algunos procesos de electropulido requieren enfriamiento en sus condiciones, para ello se utiliza bobinas de acero inoxidable 316L.

En el caso de enfriamiento de electrolitos conteniendo vapor, no es factible usar acero inoxidable debido a que la mayoría de los baños contienen ácido sulfúrico, que ataca al acero inoxidable en la bobina de enfriamiento.

Se utilizan enfriadores cuando la solución del tanque tendrá 10-15 A/gal del rectificador.

Intercambiadores de calor se utilizan cuando el amperaje de entrada es superior a 5 A/gal.

Para el caso del pulido electrolítico realizado las condiciones de trabajo eran: densidad de corriente anódica 6 - 20 A / dm<sup>2</sup>.

Temperatura de la solución 25- 95 °C, tiempo de pulido 5 -25 Procedimiento, los cátodos de plomo. La relación de superficies ánodo-cátodo son 1:2 - 1:3. La distancia entre electrodos 7 - 10 cm. Para preparar la solución el ácido crómico fue disuelto en ácido fosfórico, la solución resultante se calentaba a 120°C para alcanzar si era necesario el peso específico estipulado.

Tabla 1: Composición del electrolito para los diferentes tipos del electropulido

Electrolitos Compuestos por ácido sulfúrico en agua y solvente orgánico						
Clase	Uso	Formula		Voltaje	Tiempo	Observaciones
IV-1	acero inoxidable	agua	250 mL	1.5 a 6	1 a 2 min	
		Ácido sulfúrico	750 mL			
IV-2	acero inoxidable, Fe, Ni	agua	400 mL	1.5 a 6	2 a 6 min	
		ácido sulfúrico	600 mL			
IV-3	acero inoxidable, Fe, Ni, Mo	Agua ácido sulfúrico	750 mL	1.5 a 6	2 a 10 min	Particularmente bueno para sinterizado
			250 mL		0.3 a 1 min	Mo -32 a 80°F
IV-4	Molibdeno	agua	900 mL	1.5 a 6	0.3 a 2 min	Particularmente bueno para sinterizado
		Ácido sulfúrico	100 mL			Mo -32 a 80°F
IV-5	acero inoxidable	agua	70 mL	1.5 a 6	0.5 a 5 min	
		glicerina	200 mL			
		Ácido sulfúrico	720 mL			
IV-6	acero inoxidable, aluminio	agua	220 mL	1.5 a 12	1 a 20 min	
		Glicerina	200 mL			
		Ácido sulfúrico	580 mL			
IV-7	molibdeno	metanol (absoluto)	875 mL	6 a 18	0.5 to 1.5 min	32 to 80°F
		Ácido sulfúrico	125 mL			
IV-8	Ni-base superaleaciones	metanol (absoluto)	800 mL	30	20 s	Para aleaciones 625
		Ácido sulfúrico	200 mL			
Electrolitos compuestos por ácido crómico en agua						
V-1	acero inoxidable	agua	830 mL	1.5 a 9	2 a 10 min	
		Ácido crómico	620 g			
V-2	Zn, latón	agua	830 mL	1.5 a 12	10 a 60 s	
		ácido crómico	170 g			

Fuente: ASTM - E 1558 – 99 (2004)

#### **2.8.4 Tiempo de exposición**

El tiempo de electropulido es en general de 3 a 15 minutos para procedimientos para acabado decorativo y preparación para recubrimientos electrolíticos u otro tipo de acabado. Los amperios – Procedimiento de tratamiento son más definitivos, siendo una medida directa del tratamiento efectuado. En esta forma a mayor densidad de corriente se emplea menos tiempo. Las capacidades del tanque continúan iguales, los voltajes son más altas pero el tiempo puede acortarse lo suficiente para compensar el costo del mayor voltaje.

El voltaje para electro pulido es de 6 a 15 voltios dependiendo de la forma de la pieza, distancia del ánodo al cátodo y clase de baño.

### **2.9 Aplicaciones del electropulido**

- Tuberías

En los últimos años, el electropulido ha demostrado que proporciona un excelente acabado final en diámetros interiores y exteriores de las tuberías. El electropulido es necesario siempre que se necesiten superficies sin contaminantes, sin partículas y sin abrasiones. Además, las tuberías se benefician de la fricción mínima y del aspecto de máxima pureza del electropulido. Sus ventajas, las hacen estar presentes en la industria petroquímica, nuclear, farmacéutica, de semiconductores y alimentaria.

- Aplicaciones médicas

El campo medico se ha beneficiado del electro pulido durante muchos años. A los equipos hospitalarios, médicos y quirúrgicos (bisturíes, pinzas, sierras, implantes coronarios, óseos y articulares, prótesis, etc.) se deberían someter al electropulido para facilitar la limpieza y lograr niveles bajos de contaminación. Los objetos metálicos expuestos a la radiación y que requieran una descontaminación regular son los principales candidatos para el electropulido.

- Fabricación de semiconductores

Las salas limpias para la fabricación de semiconductores requieren de superficies sin contaminantes y sin partículas. Dado que el acabado electropulido es el acabado idóneo para componentes metálicos en una sala limpia, se incluyen mesas, sillas, consolas de equipos, sistemas de distribución de gas y fluido, contenedores de basura, sistemas de iluminación , conductos eléctricos expuestos y cajas de salida, cámaras de vacío, equipos de fabricación y de proceso .



Figura 3: Aplicaciones del electropulido: Tuberías

- Industria farmacéutica

Igual que los fabricantes de semiconductores, las empresas farmacéuticas insisten en unas superficies metálicas muy limpias. Hoy en día, los elementos internos de las mezcladoras farmacéuticas, los sistemas de suministro de productos secos, los filtros, los coladores, las vasijas, las secadoras, sistemas de corte, las espirales de enfriamiento, diferentes tipos de láminas, los intercambiadores de calor y otros importantes elementos metálicos que se encuentran electropulidos. Por motivos

microbiológicos y de cualquier otro tipo de contaminación, el electropulido ofrece la solución óptima para los componentes farmacéuticos de acero inoxidable.



Figura 4: Aplicaciones del electropulido: Industria Farmacéutica

Las propiedades antiadherentes son un requisito clave en los dispositivos de dosificación que se usan en la industria farmacéutica. Fotografía: Centro Inox, Milán / Delmet, Gorgonzola.

- Exploración energética

La industria de la exploración energética es un nuevo sector para el electropulido. Se realiza el electropulido de equipamientos de inmersión en los pozos, fundamentalmente para superpasivación frente al ataque de gases ácidos. Además, muchos componentes de plataformas petrolíferas en alta mar, incluyendo tuberías, bombas, válvulas, condensadores y sistemas de aislamiento, están electropulidos para protegerlos de la atmósfera marina.

- Industria alimentaria

El electropulido proporciona las superficies lisas, de fácil limpieza y estéticamente agradables exigidas por esta industria, además de su ventaja higiénica y de no tener contaminación. El acabado reduce la oxidación y la contaminación de los componentes de acero inoxidable usados en cocinas, industria láctea y de procesos automatizados para la producción alimentaria. Gracias al electropulido se

consigue una superficie perfectamente limpia, lo que ofrece una resistencia máxima a la formación de bacterias y depósitos de residuos.

Los depósitos de procesamiento en la industria alimentaria están electro pulidos para cumplir los más altos requisitos de higiene. Fotografía: Centro Knox, Milán.



Figura 5: Aplicaciones del electropulido: Industria alimentaria

- Tratamiento del agua

Las industrias de tratamiento y destilación del agua emplean el electropulido para mejorar la resistencia a la corrosión de los componentes del acero inoxidable y reducir la contaminación microbiológica que se podría acumular dentro de estos sistemas. Habitualmente, los componentes electropulidos en la industria del tratamiento y destilación del agua incluyen filtros, pantallas y tamices, bombas y válvulas, condensadores y tuberías.

- Preparación para el electro recubrimiento

El electropulido es excelente en la preparación de superficie para electro recubrimientos. El metal electro depositado es más terso y libre de agujeros e imperfecciones y tiene una oportunidad para la mayor adherencia posible.

Al evitar la formación y remoción de metal dañado el electro pulido proporciona " limpieza mecánica " para completar la limpieza química (ausencia de óxidos y compuestas relacionados con el metal) así como limpieza física (ausencia de materiales ajenos al metal como grasa, granos de abrasivos, aceites, etc.)

- Preparación para el anodizado. Recubrimiento de conversión.

El anodizado, recubrimientos de conversión y procedimientos parecidos implican reacciones químicas en la superficie del metal. El electropulido es de uso apropiado en la preparación de los metales para un proceso químico uniforme.

## **2.10 Ventajas y limitaciones**

Se ha demostrado que el pulido electrolítico produce una superficie con propiedades adecuadas para:

Recubrimientos electrolíticos de mayor tersura, mejor apariencia debido a la menor cantidad de oquedades, mayor protección contra la corrosión, resistencia a la corrosión cuando no haya capa metálica ni de otra índole, mayor uniformidad de anodizado, desfatado, oxidación negra y otros recubrimientos por conversión, mayor reflectividad de luz y calor y desgaste contra otras superficies de metal sin pérdidas de fragmentos metálicos que ocasionen roce indebido.

Los defectos de superficie y los efectos del trabajo en frío se pasan por alto si únicamente se especifica la tersura como criterio de calidad en el acabado de un metal. El electro pulido no sufre la influencia de la dureza o plasticidad de los metales, mientras que con los métodos abrasivos si se experimentan. Los baños

electropulidores son más fáciles de controlar que los recubrimientos metálicos electrolíticos y son menos propensos a la contaminación.

Se puede obtener una superficie lisa y libre de defectos con el electro pulido mediante la elección de una densidad de corriente óptima y configuraciones de temperatura y baños apropiados. El proceso es técnicamente superior al del pulido mecánico, porque no contamina la superficie con ningún material extraño y la superficie obtenida por electro pulido es pasiva y resistente a la corrosión

Las principales limitaciones del electro pulido son: el procedimiento no puede disimular y cubrir defectos tales como grietas e inclusiones metálicas; las aleaciones de fases múltiples en las que una fase es relativamente resistente a la disolución anódica no son de ordinario susceptibles al electro pulido, la "cascara de naranja " gruesa, la textura de superficie de molde y las rayas profundas no desaparecen con una aplicación ordinaria de electropulido, sino que primero requiere "desbaste" como se emplea para pulir y abrillantar; esto último puede invertirse usando el electro pulido como "operación de desbaste" antes de pulir y abrillantar por medio de ruedas .

Las costuras e inclusiones no metálicas imponen una limitación cuando se presentan tales condiciones, el electropulido es un buen instrumento de inspección. Una superficie electropulida electrorecubierta aunque no pase por los hábitos de inspección establecidos puede ser superior en funcionamiento.

No hay duda que el electropulido puede mejorar los productos y en muchos casos puede reducirse los costos de operación El aspecto y la calidad de las superficies electropulidas pueden ser reproducidas con tanta facilidad como los electrorecubrimientos.



### **2.11 Condiciones que afectan el electro pulido**

De acuerdo a la revisión bibliográfica y revisión de pruebas experimentales pasadas, a continuación se enumeran las condiciones más importantes que afectan el electro pulido:

- Cantidad de gas oxígeno generado
- Agitación
- La viscosidad de la solución
- Temperatura
- La razón de la precipitación del metal removido
- El espaciamiento entre cátodo - ánodo
- Tamaño de grano del metal base
- El aislamiento del metal
- La presencia de tratamientos térmicos y óxidos
- Porosidad de la superficie
- La limpieza de la superficie

### **2.12 Fallas y remedios durante el proceso**

En la tabla 2 se describe las particularidades de los principales tipos de defectos, las causas que originan dichos defectos y formas de corregirlos.

Tabla 2: Los efectos de los parámetros del proceso del electropulido sobre la resistencia a la corrosión del acero

<b>SÍNTOMAS</b>	<b>CAUSAS</b>	<b>REMEDIO</b>
Superficie mate	Excesiva concentración de cromo	Someter el baño a la Oxidación del cromo
Pulido no uniforme	1.- Mal contacto entre piezas y bastidor eléctrico. 2.- Apantallado de una Pieza sobre otra	1.- Mejorar el contacto 2.- Alterar las posiciones
Picado de las superficies antes de usar la solución para más de 30 A-horas/litros	1.- temperatura de la solución demasiado baja o alta 2.- Densidad de corriente, picaduras en las distintas partes de La superficie. 3. - La solución no ha sido electrolizada	1.- Disminuir la temperatura de la solución 25-30°C 2.-Aumentar la corriente anódica a -10 A / dm <sup>2</sup>
Picaduras en las Distintas pares de La superficie	1.- La solución contiene demasiada agua, peso específico demasiado baja. 2.- Densidad demasiado baja	1.- Calentar la solución a 120°C 2.- Aumentar la densidad a 40-50 BE

Fuente: (5) ASTM B 912-02 Standard Specification for Passivation of Stainless Steels Using Electropolishing

### **III PROCESO DEL ELECTROPULIDO DEL ACERO**

#### **3.1 Trabajo experimental y pruebas**

La parte experimental la podemos dividir en dos etapas bien definidas: La primera etapa consiste en pulir el acero haciendo variar los siguientes parámetros:

- Temperatura
- densidad de corriente
- tiempo de exposición

La segunda etapa se refiere a los ensayos experimentales para cuantificar los resultados de las variables de la superficie obtenida con cada uno de los parámetros (rugosidad, brillo, polarización Lineal).

##### **3.1.1 Equipo experimental para el electropulido**

El desarrollo del trabajo experimental se realizó en el laboratorio de fisicoquímica de la Facultad de Ingeniería Química y Textil, en donde se cuenta con los siguientes equipos.

##### **Generadores y rectificadores**

Fuente de corriente continua:

- Marca: TECHMAN, Modelo: FC-50P
- Voltaje        0-10 voltios
- Corriente     0- 20 Amperios



Figura 6: Rectificador utilizado para el electropulido del acero.

### El tanque electropulidor

El tanque ha de ser acero forrado con plomo o bien usa material de PVDF, equipado con calentador de vidrio pírex o recubierto de plomo para el calentamiento por vapor, también calefactores eléctricos de inmersión de vidrio Pírex resistentes a la corrosión. En el presente proyecto se utilizó un tanque electropulidor de PVDF, de dimensiones 15x15 cm<sup>2</sup> y de 12 cm de ala, la descripción grafica se presenta en la siguiente figura.

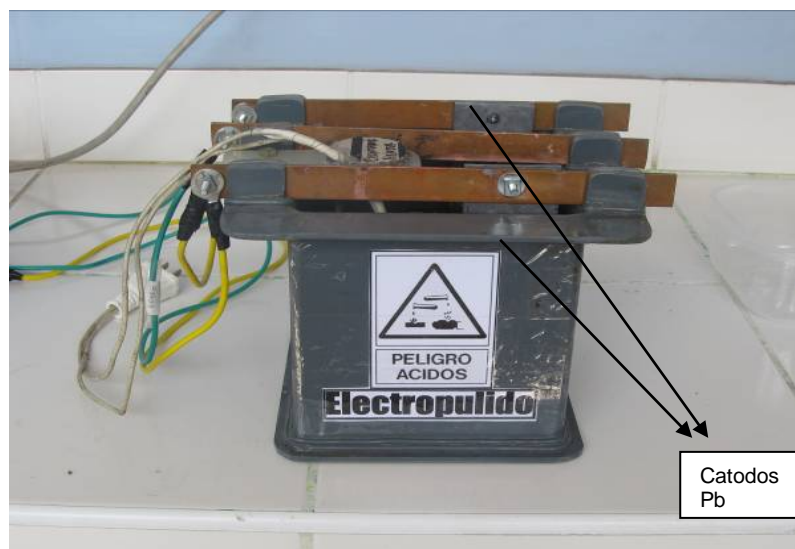


Figura 7: Tanque para el pulido electrolítico del acero.

### Los cátodos

Se utilizaron cátodos de plomo, de 12 cm de longitud y 7 cm de ancho, los cátodos se fijaron de la barra catódica como ilustra la figura 8. La separación entre los cátodos permitió una libre mezcla del baño en la parte de los serpentines de calentamiento.

### El calentador

Los serpentines de calentamiento se colocan a los lados del tanque detrás de los cátodos separados de estos y en una posición que impida convertirse en electrodos bipolares cuando se electro pulen las piezas. Se pueden emplear calentadores eléctricos de inmersión dependiendo de las dimensiones del tanque y de su colocación y de la temperatura de funcionamiento. El calentador que se utilizó fue de vidrio pírex, la temperatura máxima alcanzada por el baño fue de 120 °C en un tiempo de 15 minutos. La siguiente figura describe la ubicación del calentador en el sistema de electro pulido.

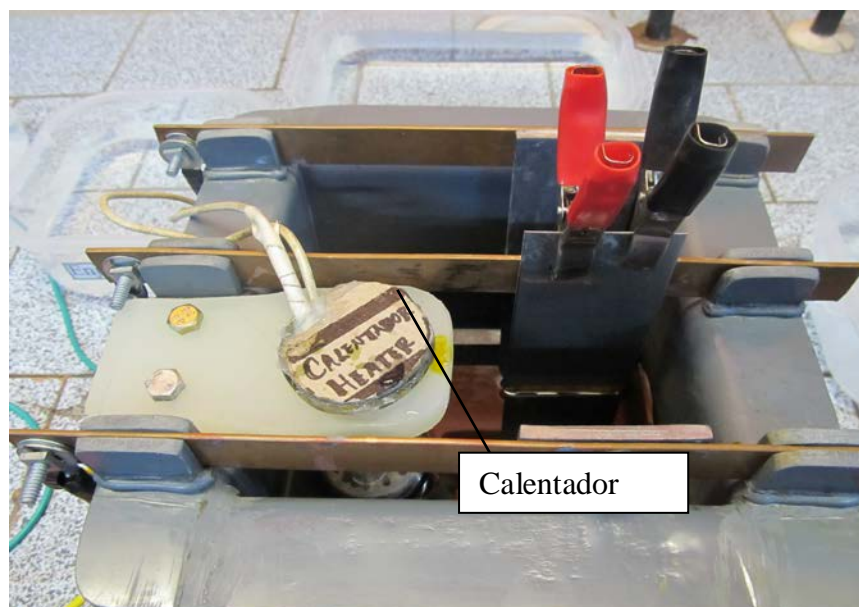


Figura 8: Ubicación del calentador en el tanque electropulidor.

### 3.1.2 Control de la temperatura y densidad del electrolito.

Para evaluar los efectos provocados por la temperatura sobre la rugosidad y el brillo, se procedió a calentar el baño electropulidor sumergiendo una resistencia como se mencionó anteriormente, la temperatura se controló por medio de un termómetro de mercurio. En cuanto a la densidad, las siguientes condiciones fueron mantenidas:

- Temperatura variable: 25 - 30 - 35°C - 40°C - 60°C - 80°C - 90°C - 96°C
- Densidad del electrolito: 50 °BE

El control de temperatura y densidad se llevó a cabo como muestran la figura:

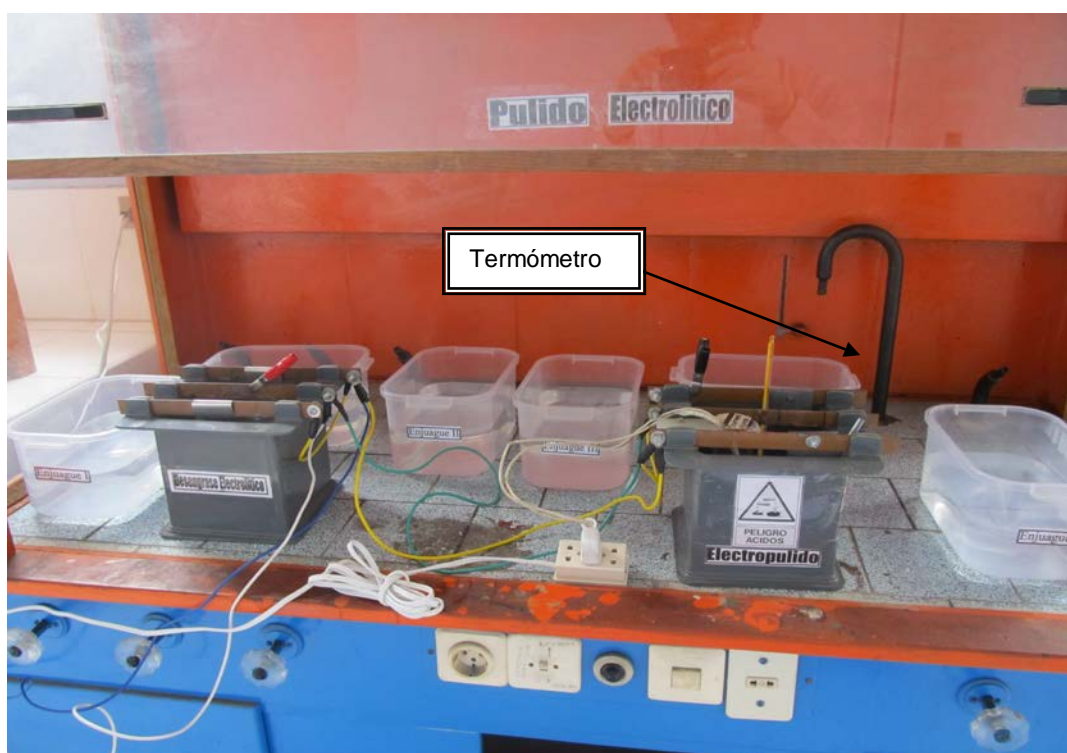


Figura 9: Control de temperatura en el baño electrolítico.

### 3.1.3 Desengrase electrolítico.

Consiste en someter las piezas, actuando como cátodos, en la acción de una solución alcalina. Las grasas saponificables son atacadas y saponificadas por la acción de la solución alcalina, y el hidrógeno originado en la electrolisis sobre el cátodo favorece que las grasas se liberen de la pieza. Con este sistema, también se desprenden los óxidos metálicos por su reducción a través del hidrógeno.

El pulido electrolítico fue realizado como el proceso previo al electropulido del acero en el laboratorio, así cada pieza a electropulir primeramente era sometida a enjuague y neutralización, luego de ello, pasa por un desengrase electrolítico, la siguiente figura muestra dicho procedimiento.

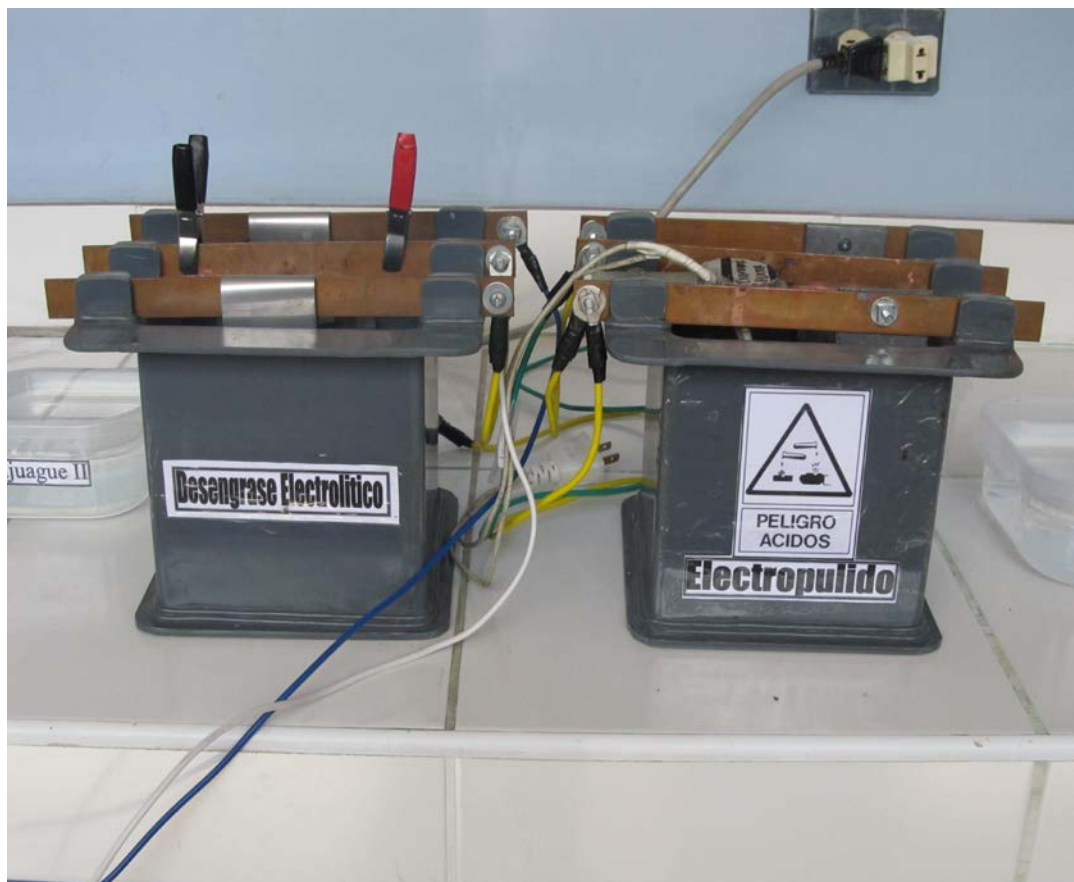


Figura 10: Diagrama del desengrase electrolítico.

### 3.1.4 Selección del electrolito

El electrolito seleccionado para la prueba depende del metal escogido para la realización de la parte experimental, para el acero fue seleccionado el baño electrolítico conteniendo ácido sulfúrico, ácido fosfórico, ácido crómico y agua destilada de acuerdo a la recomendación de (7) ASTM B 912-02 Standard Specification for Passivation of Stainless Steels Using Electropolishing. Los porcentajes de participación de los reactivos fueron 6%, 14%, 16% y 65% respectivamente. Cabe anotar que corresponden a porcentajes en peso.

Una vez seleccionado el baño con el que se va trabajar, se definió las dimensiones y la forma que debían de tener las probetas de acero a fin de obtener la mejor área efectiva la cual depende de la capacidad del rectificador de corriente continua disponible, de la capacidad de los recipientes para el baño y de la densidad de corriente necesaria para electropulir; quedando establecida la forma rectangular plana y de las siguientes dimensiones:  $5 \times 5 \text{ cm}^2$  ; lo que da una área efectiva de trabajo de  $2,5 \text{ dcm}^2$ .

Otro parámetro adicional que sirvió para seleccionar el electrolito fue el rango de trabajo de la densidad de corriente que establecían los investigadores, esto es 2 - 15 A. Por cuestiones de cálculo se escogió el valor medio es decir 10 A, para el diseño del tanque electropulidor se requirió un recipiente capaz de contener 3 litros de solución electrolítica.

Una vez conocido el volumen del baño electrolítico se procedió a su preparación; primero se mezcló el dicromato con agua destilada para obtener ácido crómico, luego se añadió ácido fosfórico y ácido sulfúrico en los porcentajes en peso señalados anteriormente. La solución así obtenida fue exotérmica y de una coloración verde oscura.



### **3.1.5 Materiales utilizados**

Adicionalmente se requirieron los siguientes materiales:

- 2 clip de lagarto
- 1 extensión eléctrica
- 1 resistencia de 500 W
- Solución desengrasante
- Recipientes para el proceso de desengrase
- Recipientes para el enjuague
- Recipientes para la neutralización
- Termómetro, densímetro.
- Sellante

### **3.1.6 Estudio de las variables del proceso. Efecto sobre la rugosidad y brillo de la superficie**

Empleando el acero para la parte experimental se obtuvieron probetas rectangulares de 10 x 5 x 5 mm, dimensiones necesarias para mantener un área efectiva de 0.25 dcm<sup>2</sup>.

Fue necesario un volumen aproximado de 2.3 litros para poder realizar el proceso de electropulido. Cada probeta fue electropulida individualmente; las probetas fueron suspendidas de una barra de cobre en el centro del recipiente, se mantuvo una distancia entre ánodo y cátodo de 10 cm. Las probetas y los cátodos fueron conectados al rectificador por medio de cables y arnillos, los cables eran de cobre recubiertos de plástico para evitar el ataque químico durante la operación.

Los Ánodos fueron sujetos a la barra de cobre por medio de las pinzas de lagarto, los mismos que permitían mantener la distancia necesaria entre cada elemento.

La corriente de trabajo fue medida directamente en la fuente, el cual cuenta con un amperímetro incorporado al equipo igual que el voltaje con un voltímetro. La temperatura fue medida cada cierto tiempo con un termómetro de mercurio. El diagrama de flujo de la siguiente figura fue seguido durante el electro pulido.

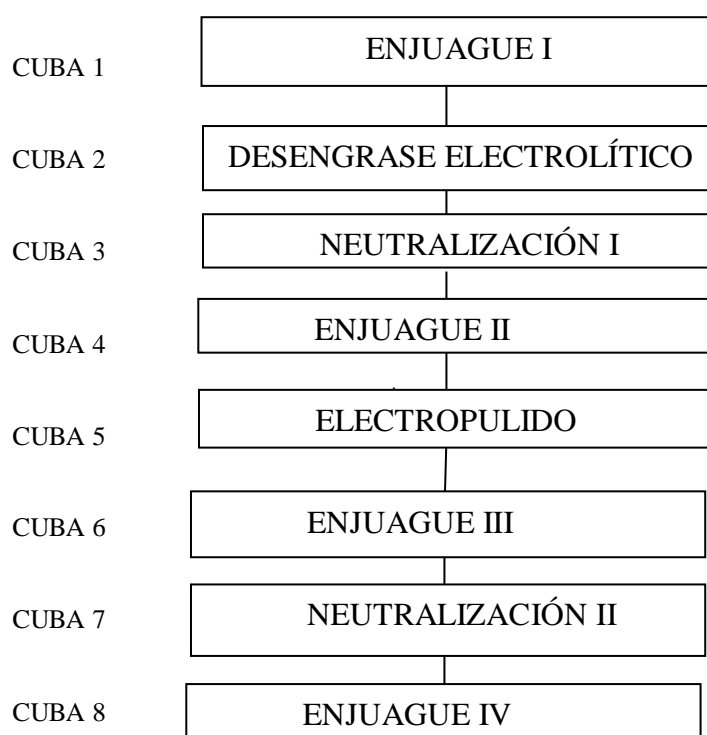


Figura 11: Flujograma del proceso de electropulido del acero

Enjuague I: de la probeta utilizando agua destilada temperatura ambiente.

Desengrase electrolítico utilizando corriente eléctrica y solución desengrasante

Neutralización I de la probeta utilizando hidróxido de sodio a temperatura ambiente.

Enjuague II: enjuague de la probeta utilizando agua destilada antes del proceso de electro pulido.

Pulido electrolítico: en ácido orto fosfórico, ácido crómico y ácido sulfúrico disueltos en agua desionizada y con los parámetros de trabajo.

Enjuague III: enjuague usando agua destilada después del proceso del electro pulido.

Neutralización II de la probeta utilizando hidróxido de sodio para neutralizar restos de ácidos del electro pulido.

Enjuague IV: enjuague usando agua destilada después del proceso del electro pulido, Secado con papel tisú.

En la figura 12 se muestra el esquema del equipo utilizado en el estudio del pulido electrolytico en el acero.



Figura 12: Esquema de trabajo del pulido electrolytico del Acero.

### 3.1.7 Densidad de corriente

Para evaluar la rugosidad y brillo obtenido variando la densidad de corriente, se procedió a aumentar gradualmente la intensidad de corriente del rectificador controlada a través del amperímetro con cada una de las probetas a electropulir.

La densidad de corriente varios en el siguiente rango.

- Densidad de corriente 5 A- 8 A – 10 A- 15 A

### **3.1.8 Tiempo de exposición**

Otro parámetro para evaluar el comportamiento de la rugosidad y brillo de las probetas tratadas con el electro pulido fue el tiempo de exposición o el tiempo necesario para alcanzar condiciones de un buen acabado superficial y rugosidad; para esto se requirió de probetas electropulidas a diferentes tiempos y con las siguientes condiciones de ensayo:

- Tiempo de exposición: Variable entre 5 – 25 minutos.

## **3.2 Resultados**

En la tabla 3 se presenta valores tabulados de acuerdo a la variación de cada uno de los parámetros, se mantuvo la densidad del electrolito en 50 °BE, para un área a electropulir de 25 cm<sup>2</sup>.

### **3.2.1 Análisis metalográfico de las piezas**

A continuación se presentan los análisis metalográficos con el microscopio óptico y el microscopio de barrido electrónico, ambos realizados en los laboratorios de física de la facultas de ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería.

El microscopio óptico nos da la posibilidad de observar el perfil de las probetas electropulidas, además de observar la superficie de las piezas a electropulir, por otro lado, el microscopio de barrido electrónico (SEM), nos da la posibilidad de observar la superficie de la probeta a escalas nanométricas. A continuación se muestra la figura de trabajo del microscopio SEM.

Tabla 3: Resultados del electropulido con variaciones de tiempo, temperatura e intensidad de corriente.

Tiempo del electropulido (Procedimiento)	Temperatura de la solución (°C)	Intensidad de corriente (A)	Probeta	Peso inicial (g)	Peso final (g)	$\Delta$ Peso	Pruebas metalográficas	Observaciones			
5	25	5,00	A-5-25	29,4987	28,6739	0,8248	Pruebas con microscopio de barrido electrónico (SEM), y microscopio óptico.	Zonas sin electropulir y Acabado superficial opaco para más de 10 min			
10		5,00	A-10-25	30,7944	29,8567	0,9377					
15		10,00	A-15-25	29,9981	29,1924	0,8057					
>15		10,00	A-20-25	30,6098	29,9991	0,6107					
5	40	5,00	B-5-45	15,7176	15,1638	0,5538		Pruebas con microscopio de barrido electrónico (SEM), y microscopio óptico.	Presencia de zonas sin electropulir, a tiempos mayores de 10 min aparecen zonas oscuras		
10		5,00	B-10-45	15,6205	14,7329	0,8876					
15		10,00	B-15-45	15,8223	14,5115	1,3108					
>15		10,00	B-20-45	15,6105	13,1138	2,4967					
5	60	5,00	C-5-60	15,9176	15,1638	0,7538			Pruebas con microscopio de barrido electrónico (SEM), y microscopio óptico.	Se incrementan las áreas pulidas con respecto a 40 °C, sin embargo se observan zonas con ligero acabado.	
10		5,00	C-10-60	15,3205	14,7329	0,5876					
15		10,00	C-15-60	15,2223	14,5115	0,7108					
>15		10,00	C-20-60	15,1521	14,9921	0,1600					
5	80	5,00	D-5-80	15,7984	14,824	0,9744				Pruebas con microscopio de barrido electrónico (SEM), y microscopio óptico.	Se observa un mejor acabado en menores para tiempos mayores a 10 min aparecen zonas más oscuras.
10		5,00	D-10-80	15,7084	14,7379	0,9705					
15		10,00	D-15-80	15,7083	15,3415	0,3668					
>15		10,00	D-20-80	15,9054	15,3424	0,5630					
5	90	5,00	E-5-90	15,9176	15,0138	0,9038	Pruebas con microscopio de barrido electrónico (SEM), y microscopio óptico.				Empiezan pequeñas manchas en la probeta, para tiempos más de 10 min
10		5,00	E-10-90	15,3205	14,3209	0,9996					
15		10,00	E-15-90	15,2223	14,6115	0,6108					
>15		10,00	E-20-90	15,1521	14,9921	0,1600					
5	95	5,00	F-5-95	15,7176	15,0638	0,6538		Pruebas con microscopio de barrido electrónico (SEM), y microscopio óptico.			Presencia de mordentado y manchas a tiempos mayores a 10 min
10		5,00	F-10-95	15,6205	14,6329	0,9876					
15		10,00	F-15-95	15,8223	14,9115	0,9108					
>15		10,00	F-20-95	15,5521	14,7921	0,7600					



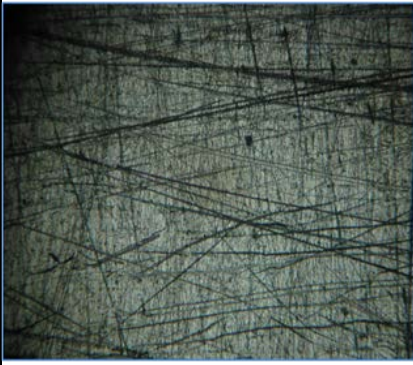
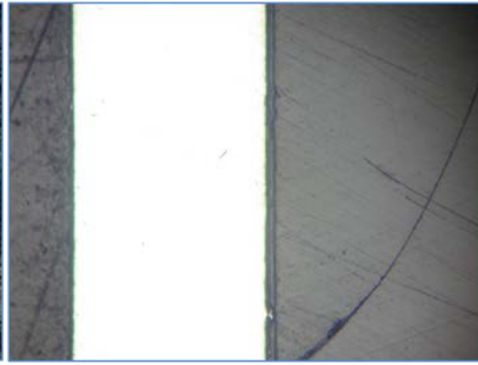

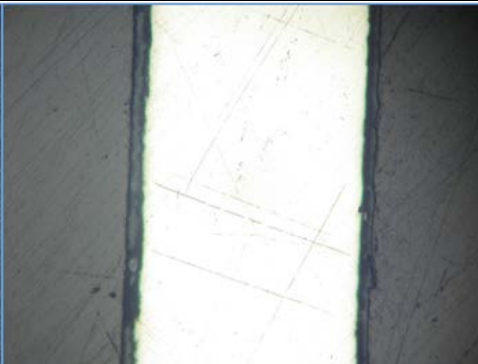


Figura 13: Fotografía del microscopio de barrido electrónico SEM

Laboratorio de ciencias-UNI.





### 3.2.2 Micrografías obtenidas con microscopio óptico

Las probetas electropulidas a diferentes condiciones de electropulido ( variaciones en el tiempo y corriente de electropulido) y temperatura fueron sometidas a micrografías superficiales, obteniéndose dos vistas de las probetas electropulidas, pudiéndose comparar la diferencia entre la muestra a condiciones sin tratamiento y muestras electropulidas a diferentes a las diferentes condiciones, identificándose la superficie con mejor acabado superficial para el electropulido a 10 min, 10 A y temperatura de trabajo de 80 °C. La tabla 4 muestra las metalografías obtenidas con el microscopio electrónico a las diferentes condiciones.

Tabla 4: Metalografías obtenidas con el microscopio óptico

Condiciones	Vista superficial	Vista de Perfil
Condiciones iniciales		
Sin tratamiento		
Temperatura = 40° C		
Electropulido en 10 min y 10 A		
Temperatura = 60° C		
Electropulido en 10 min y 10 A		

Continúa

Condiciones	Vista superficial	Vista de Perfil
	Temperatura = 80° C	
Electropulido en 10 min y 10 A		
	Temperatura = 95° C	
Electropulido en 15 min y 15 A		

**Fuente:** Elaboración propia.


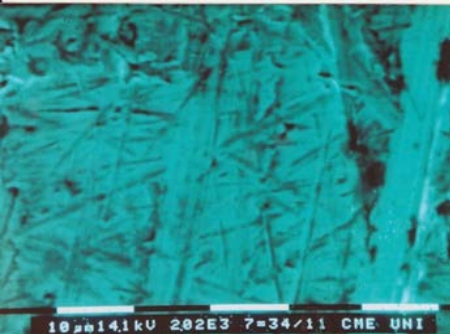
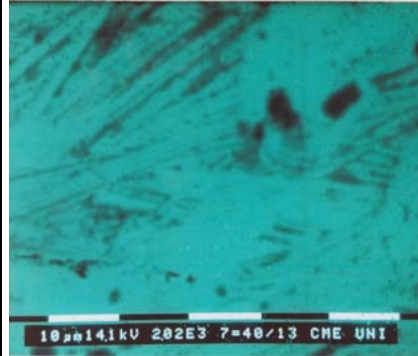


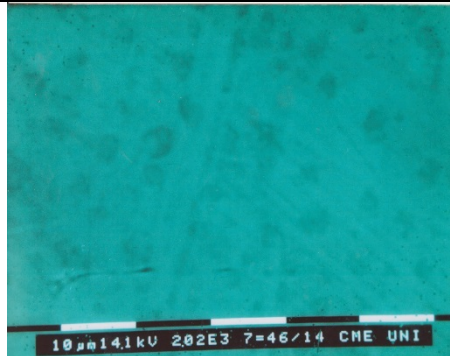
### 3.2.3 Micrografías obtenidas con microscopio de barrido electrónico (SEM)

El microscopio electrónico de barrido, conocido por sus siglas inglesas SEM, utiliza electrones en lugar de luz para formar una imagen. Para lograrlo, el equipo cuenta con un dispositivo (filamento) que genera un haz de electrones para iluminar la muestra y con diferentes detectores se recogen después los electrones generados de la interacción con la superficie de la misma para crear una imagen que refleja las características superficiales de la misma, pudiendo proporcionar información de las formas, texturas y hasta composición química de sus constituyentes.









En la Tabla 5 se muestran las micrografías obtenidas para el pulido electrolítico, en las diferentes condiciones de temperatura de electropulido, mientras que el tiempo y la corriente de electropulido se mantienen constantes.

Tabla 5: Metalografías obtenidas con el microscopio de barrido electrónico

Condiciones	Vista 1	Vista 2
	Condiciones Iniciales	
Sin tratamiento/ condiciones iniciales		
	Temperatura = 60° C	
Electropulido en 10 min y 10 A		
	Temperatura = 80° C	
Electropulido en 10 min y 10 A		

Continúa

Condiciones	Vista superficial	Vista de Perfil
	Temperatura = 85° C	
Electropulido en 10 min y 10 A		
	Temperatura = 90° C	
Electropulido en 10 min y 10 A		
	Temperatura = 95° C	
Electropulido en 10 min y 10 A		

**Fuente:** Elaboración propia, micrografías SEM laboratorio de ciencias.

Micrografías tomadas a 10 μm con autoajuste en las condiciones propias del sensor del equipo para obtener la mayor nitidez en las vistas.

### **3.2.4 Análisis de reflectancia mediante espectrofotometría**

El aspecto general de la superficie de un material cuando se refleja la luz se conoce como brillo. El brillo de los materiales puede ser de dos tipos generales: Metálico y No metálico.

La reflectancia total, definida como la relación entre el flujo luminoso reflejado y el incidente, generalmente en las superficies reales se compone de la reflectancia especular más la reflectancia difusa. La reflectancia de una muestra se expresa como una fracción entre 0 y 1, o como un porcentaje entre 0 y 100.

El espectrofotómetro es un aparato diseñado para medir el espectro de transmitancia o reflectancia de un objeto. El objetivo de esas aparatos es el de comparar la radiación para cada longitud de onda a la salida del objeto con la incidente.

El funcionamiento de un espectrofotómetro consiste básicamente en iluminar la muestra con luz blanca y calcular la cantidad de luz que refleja dicha muestra en una serie de intervalos de longitudes de onda. Esa se consigue haciendo pasar la luz a través de un dispositivo monocromático que fracciona la luz en distintos intervalos de longitudes de onda.

Para la prueba experimental, se realiza mediante un estándar de comparación con el espejo de plata (Ag), el cual se le asigna un 100% de reflectancia, las pruebas se realizaron para cada muestra obtenida en Laboratorio.

### **3.2.5 Ensayos de polarización lineal**

La técnica electroquímica, comúnmente referida como la técnica LPR o de Resistencia de Polarización Lineal, es un método para el monitoreo de la corrosión que permite medir las tasas de corrosión de forma directa en tiempo real

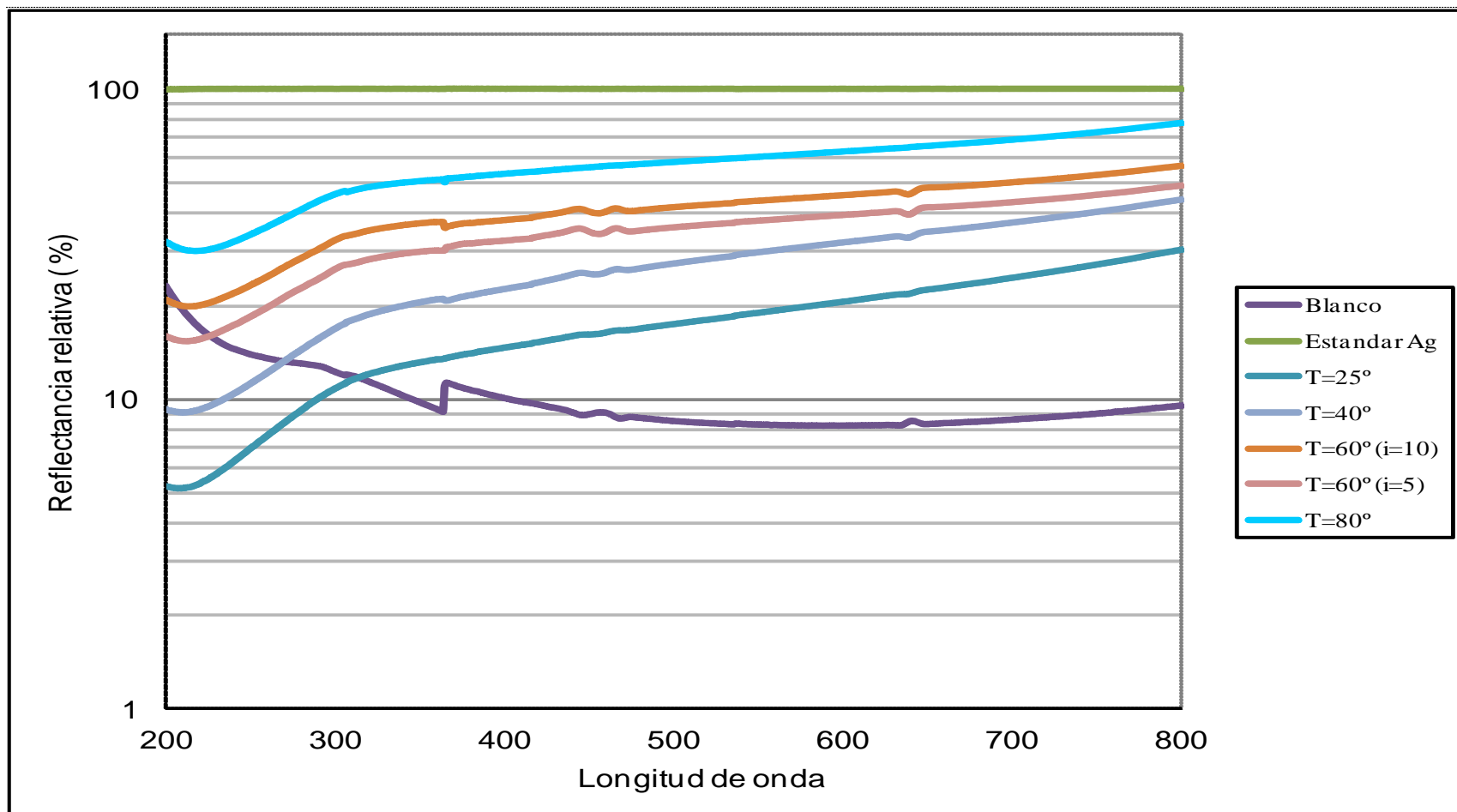


Figura 14: Pruebas de reflectancia en las diversas condiciones de trabajo

Aunque está limitado su uso a medios conductivos líquidos, el tiempo de respuesta y la calidad de los datos que aporta esta técnica es claramente superior, donde sea aplicable, frente a todos los otros medios de monitoreo de la corrosión.

La técnica LPR es particularmente útil como un método de rápida identificación de la tasa de corrosión presente y el efecto de las acciones tomadas contra ésta.

### Principios de operación

Cuando un electrodo metálico o de aleación es inmerso en un líquido electrolíticamente conductivo con suficiente poder oxidante, éste se empezará a corroer a través de un fenómeno típico electroquímico. Este proceso involucra dos reacciones simultáneas y complementarias.

En la zona anódica, el metal molecular empezará a pasar a través de la superficie sólida hacia la solución adyacente, y de esta forma, deja un excedente de electrones en la superficie metálica. El exceso de electrones fluirá a las zonas cercanas adyacentes, designadas como áreas catódicas, las cuales serán oxidadas por los agentes oxidantes del líquido corrosivo. Como ejemplo, se presenta un diagrama que ilustra el hierro disolviéndose en una solución ácida.

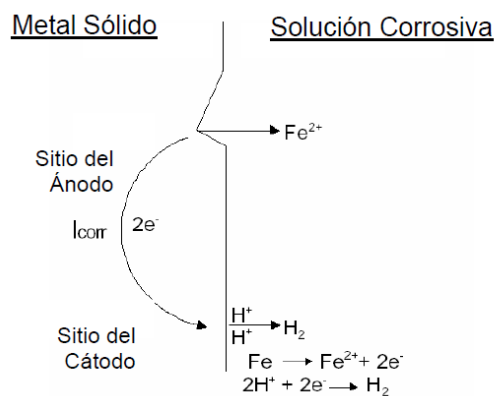


Figura 15: Mecanismo de corrosión

### Resistencia a la polarización lineal

El método consiste en la aplicación de un sobrepotencial, respecto del potencial de equilibrio, lo suficientemente pequeño como para no alterar el sistema pero suficiente como para poder conocer cuál es el comportamiento del electrodo en ese medio frente a las reacciones de oxidación y de reducción. De esta forma, se puede seguir la evolución del proceso de corrosión con el tiempo. Este método asume que la corrosión electroquímica se predice de forma correcta por la ecuación clásica de Stern-Geary (Hakka et. al, 1995).

$$I_{corr} = B/Rp$$

$$B = (b_a b_c) / [ 2.303 (b_a + b_c) ]$$

Donde  $b_a$  y  $b_c$  son las pendientes de Tafel anódica y catódica, respectivamente.

$I_{corr}$  es la densidad de corriente de corrosión,  $Rp$  es la resistencia a la polarización y  $b_a$  y  $b_c$  son constantes para el metal.

La ecuación de Stern y Geary establece la relación entre la densidad de corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ), es decir, la velocidad de corrosión, con la resistencia a la polarización. Esta ecuación recuerda la conocida Ley de Ohm, donde se establece que la diferencia de potencial entre dos puntos resulta en un flujo de corriente limitado por la presencia de una resistencia.

La constante B en la ecuación sirve para pasar de la proporcionalidad a la igualdad y presenta una relación existente entre las pendientes de Tafel. Queda claro a partir de esta relación, que es indispensable que exista el comportamiento tafeliano en el sistema electroquímico, para que la ecuación de Stern y Geary pueda ser aplicable.

### **Procedimiento experimental**

Para realizar un estudio experimental de Resistencia a la polarización, lo mejor es acudir a la norma ASTM G 59-91 “Práctica estándar para realizar medidas de resistencia a la polarización potenciodinámica”.

Se siguieron los siguientes pasos para realizar las pruebas experimentales:

- Usar un puente salino que acerque el electrodo de referencia a 2 o 3 mm de la superficie del electrodo de trabajo.
- Se utilizó cloruro de sodio 3%.
- Se registró el potencial de corrosión después de 5 minutos.
- Se aplicó un potencial 30 mV más negativo que el potencial registrado.
- Un minuto después que se aplique el potencial, se inicia un barrido en dirección anódica a 0.6 V/h (10 mV/min), registrando el potencial y la corriente continuamente.
- Terminado el barrido cuando se alcanza un valor de 30 mV más positivo que el potencial de corrosión.
- Graficar la curva de polarización.
- Determinar gráficamente la resistencia a la polarización,  $R_p$ , como la tangente a la curva en el origen de la gráfica ( $\Delta E = 0$ ).

En la Figura 16 se muestra el esquema de trabajo en el Laboratorio y Figura 17 se muestra la prueba experimental del ensayo de polarización lineal.



Figura 16: Equipo experimental en Laboratorio



Figura 17: Procedimiento experimental en Laboratorio, polarizacion lineal. -

En la Tabla 6 se presenta la tabla resumen de los resultados de pruebas de polarización lineal para condiciones de tiempo = 10 min;  $i = 10$  A, además de las siguientes condiciones de trabajo para el acero.



$E_{\text{inicial}} = -0,03 \text{ V}$

$E_{\text{final}} = 0,5 \text{ V}$

Área muestra =  $0,7854 \text{ cm}^2$

Densidad del material =  $7,86 \text{ mg/cm}^3$

Peso de la muestra =  $27,9235 \text{ gramos}$ .

Electrodo de referencia = Calomel.

De la curva potencioestática se determina, velocidad de corrosión,  $i_{\text{corr}}$ .

Tabla 6: Ensayos de polarización Lineal.

Temperatura (°C)	$i_{\text{corr}}$	$E_{\text{corr}}$	velocidad de corrosión (mpy)
25*	16,3 nA	-148 mV	9,52E-03
25	1,3 nA	4,9 mV	7,58E-04
60	1,2 nA	12,2 mV	6,97E-04
90	16,9 pA	82,0 mV	9,86E-06

\* Condiciones iniciales, muestra sin tratamiento.

Donde nA= nano amperios, pA= pico amperio.

En la Figura 18 y en la Figura 19 se presentan las curvas potencioestática para la condición inicial y condición óptima del electropulido respectivamente.

Condiciones de operación: Tiempo= 10 min;  $i = 10 \text{ A}$ .

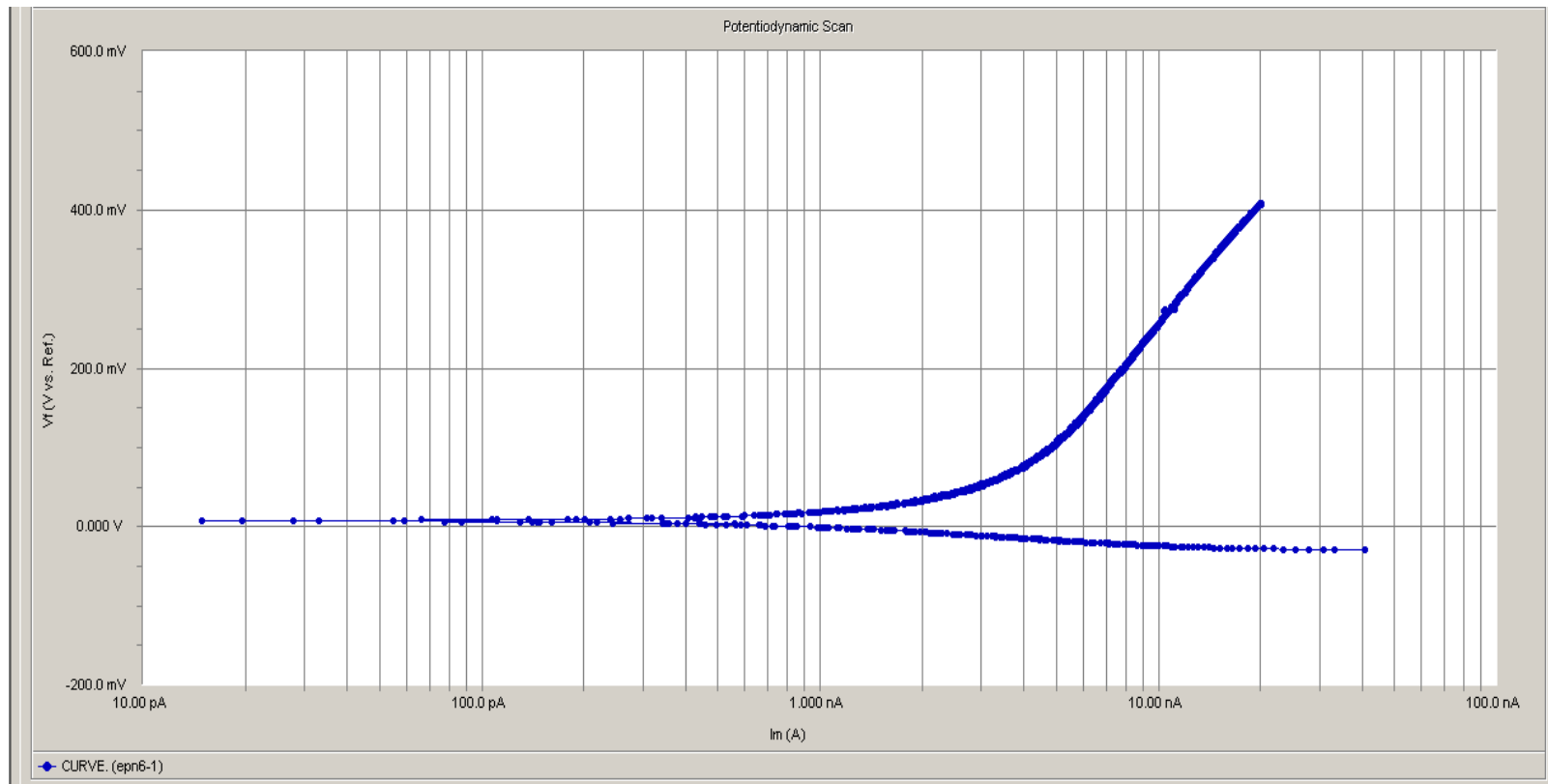


Figura 18: Curva potenciostática, condición inicial.

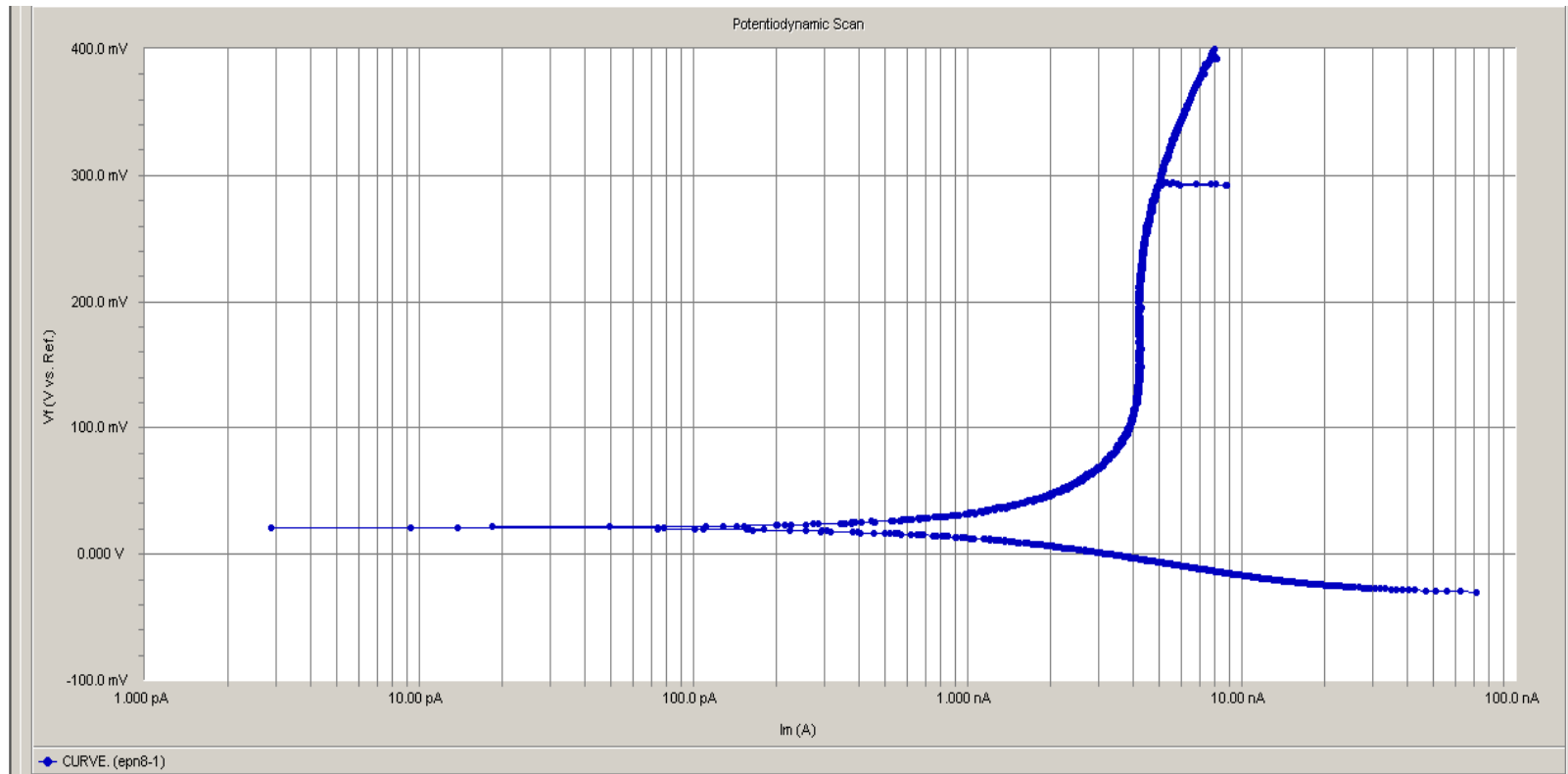


Figura 19: Curva potencioestática, condición óptima.

Condiciones de operación: Tiempo= 10 min;  $i = 10$  A.

### 3.3 Discusión de resultados

Para evaluar el efecto que tiene el tiempo de exposición sobre la rugosidad de superficie nos basaremos en las figuras de la sección 4-2, donde se observa el comportamiento de la rugosidad de la superficie de la probeta cuando es expuesta durante varios tiempos de tratamiento en el baño electropulidor; aquí nos damos cuenta que los valores de tiempo en los resultados óptimos en minutos están comprendidos dentro del rango 5 min y 10 min es donde se pudo lograr una rugosidad aceptable. Más allá de estos valores, tanto como aumentando los tiempos provocan una mayor rugosidad.

Por el contrario, si analizamos la apariencia brillante de una probeta pulida con tiempos mayores a 10 minutos nos damos cuenta que esta logra brillo pero su rugosidad no es aceptable debido al tiempo que se la tuvo expuesta al baño electropulidor. Caso tiempo 15 minutos y temperatura de 95°C.

Al evaluar los gráficos de la tabla 2 podemos determinar que la menor rugosidad la alcanzamos cuando trabajamos a 80 y 90°C y mantenemos los parámetros de densidad de electrolito en 50 °BE, densidad de corriente a 10 A y tiempo de 10 min. Además, a medida que incrementamos la temperatura la rugosidad se incrementa hasta volverse casi constante, esto nos da un indicativo que la rugosidad es independiente de la temperatura, si observamos la figura de la tabla 2 en la que se fotografió con el microscopio metalográfico la superficie tratada con 95 °C de temperatura vemos un ataque químico que provoca la revelación de la microestructura con fases presentes, un acabado superficial nada satisfactorio por la opacidad y presencia de manchas, por lo tanto la temperatura si tiene mucha influencia sobre el acabado superficial de la pieza.

Para los ensayos con el microscopio de barrido electrónico (SEM), de la Tabla 3, se puede observar la variación que se obtiene en el acabado superficial con respecto a las condiciones iniciales en donde se observa las imperfecciones a escala de micrómetros. Con el incremento de la temperatura se puede observar

que van disminuyendo las imperfecciones y se muestra una metalografía más uniforme, tal es el caso que a 80°C y 85°C ya no se observa las pequeñas manchas oscuras que son visibles a 60°C; por otro lado, para condiciones con exceso de electropulido (90°C y 95°C), se observa que la superficie empieza a mordentarse apareciendo pequeñas manchas oscuras sobre la superficie.

De la figura 15, se puede observar que el mayor brillo superficial con respecto al espejo de plata se alcanza con la muestra cuya condición de trabajo se llevó a cabo a la temperatura de 80°C, alcanzando casi un 80% de reflectancia; seguidamente la muestra cuyas condiciones de trabajo son de 60°C alcanzan una reflectancia de 60% ( $i=10$  A). Se puede observar la influencia de la temperatura de trabajo en el brillo superficial, tal es así, a las condiciones iniciales (blanco), la reflectancia del acero es aproximadamente el 10% con respecto al espejo de plata.

Finalmente, de los ensayos de polarización lineal de la sección 3.2.5 se presenta los resultados en la tabla 4, en donde se observa el efecto del electropulido sobre la velocidad de corrosión, siendo estas a las condiciones iniciales  $9,52E-03$  mpy  $i=16,3$  nA, mientras que a las condiciones óptimas ( 90°C),  $9,86E-06$  mpy  $i=16,9$ pA.

## IV CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

1. La temperatura de trabajo no debe exceder de 90 0C y tiempos no mayores de 15 minutos, si la temperatura es incrementada no se obtiene superficies pulidas, las probetas se presentan manchadas y opacas debido al ataque químico provocado por el baño electrolítico.
2. Para obtener un buen acabado superficial libre de irregularidades y con brillo es necesario electropulir con intensidades de corriente de 5 a 10 amperios. Electropulir con intensidades de corriente fuera de este rango no producen superficies lisas; por lo tanto existen zonas delimitadas en las que se pueden obtener resultados favorables, como también zonas en que el pulido produce picaduras de corrosión y zonas donde el resultados son superficies mates.
3. La densidad del electrolito no influye de sobremanera en la rugosidad de la superficie de las piezas pero si influye en la apariencia y acabado de las mismas; por consiguiente con densidades menores a la estipulada se consiguen acabados menos brillantes.
4. Para obtener resultados favorables en el electropulido fue necesario trabajar con rangos de tiempo comprendidos entre 5 y 10 min debido a que se logra un brillo llamativo, acabado óptimo y rugosidad final aceptable. Si se trabaja con valores superiores la superficie se opaca y las irregularidades de la superficie no desaparecen.
- 5.- El electropulido mejora hasta 8 veces más el brillo del acero, además incrementa la resistencia a la corrosión confiriéndole al material una menor velocidad de corrosión.

## 4.2 Recomendaciones

1. Es preciso que la composición, la densidad de corriente anódica del baño y sobretodo la temperatura se controlen cuidadosamente, ya que de no hacerlo se forma superficies oscuras y rugosas.
2. Se debe tener mucho cuidado en la preparación de la pieza a electropulir en especial el desengrase antes del baño electrolítico para eliminar toda la grasa y polvo adherido. Para el secado final de la pieza es necesaria la utilización de alcohol y algodón para evitar el manchado de las piezas por el agua.
3. Al suspender las piezas dentro del baño se debe tener en cuenta la posición para que no se acumulen las burbujas de oxígeno; si no se eliminan fácilmente las burbujas de oxígeno del ánodo se origina una disolución no uniforme, dando como resultado la aparición de surcos y hoyos.
4. La rugosidad inicial de una pieza para electropulido debe haber sido trabajado previamente utilizando lijas.
5. Para un mejor control de la composición del baño es necesario un análisis químico adecuado que indique la cantidad de reactivos requeridos para mantener el nivel de operación. Si el metal removido permanece disuelto en el electrolito parte de la solución puede ser decantada en intervalos regulares y reemplazados por electrolito fresco.

## V BIBLIOGRAFÍA

- (1). JACQUET, P. Le Genie Civil, 1936, revista No 4.
- (2). ELMORE, W. C., Journal of Applied Physic, 1939 – 1940, revista No 10, revista 11.
- (3). BATASHEV, K P. and NIKITIN, E. N., Zhur. Prikland. Khim,1950, revista No 3.
- (4). LAYNER, V. Y., Electrolytic Polishing and Etching of Metals, Mashgiz, Journal of The Electrochemical Society, 1947.
- (5). ASTM Standard B912-00, Standard Specification for Passivation of Stainless Steels Using elctropolishing, ASTM internacional, West Conshohocken, PA, .www.astm.org.
- (6). G.F. Vander Voort. "Chemical and Electrolytic Polishing," ASM Handbook, Vol. 9: Metallography and Microstructures, ASM International, 2004. Segunda edición, página 281-293.
- (7). Faust, C.L. Electropolishing—Stainless Steel. Part II, Met. Finish. 1983. Página 53–56.
- (8). ASTM A967. Standard Specification for Chemical pasivación, ASTM internacional, West Conshohocken, PA, .www.astm.org.
- (9). ASME BPE. Standards for Electropolishing Bioprocessing Equipment SEMI, Electropolishing Specifications for Semicondutor Applications, www.asme.org