

T
673.3
ALB



Escuela Superior Politécnica del Litoral
FACULTAD DE INGENIERIA EN MECANICA Y CIENCIAS DE
LA PRODUCCION



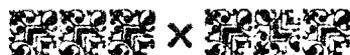
"Caracterización del Proceso de
Electropulido del Bronce"

TESIS DE GRADO

Previa la Obtención del Título de:
INGENIERO MECANICO

Presentada por:

SORAYA INDIRA ALBAN MORALES



Guayaquil - Ecuador

Año - 1997



AGRADECIMIENTO

•

Mi gratitud y reconocimiento a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL que a través de sus profesores me entrego los conocimientos que serán la base de mi carrera profesional.

A mi Director de Tesis ING. JOSE PACHECO, por su ayuda brindada que se refleja en la culminación de esta etapa estudiantil.

Al Sr. MARCO ROJANO por todo el apoyo prestado en la realización del presente trabajo de Tesis .

Al ING. RICARDO GÓMEZ por su apoyo incondicional durante mi vida universitaria.

DEDICATORIA

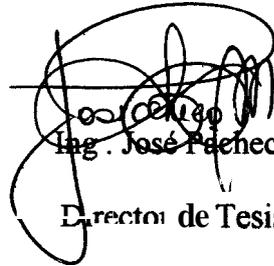
**A DIOS.
A MI PADRE EN EL CIELO.
A MI MADRE.
A MIS HERMANOS:**

TRIBUNAL DE GRADUACION



Ing. Mario Patiño

Sub-Decano



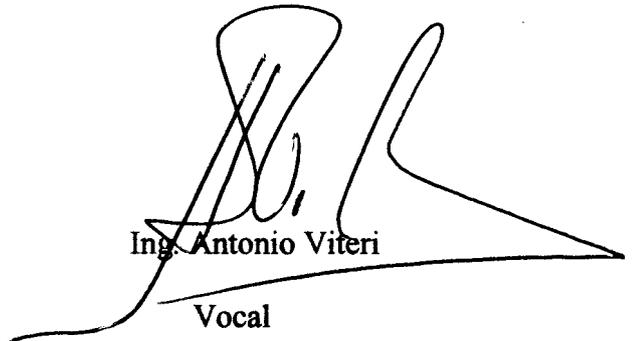
Ing. José Pacheco

Director de Tesis



Ing. Julián Peña E.

Vocal



Ing. Antonio Viteri

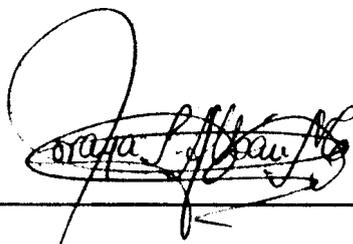
Vocal

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL"

a

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Soraya I. Alban M.', is written over a horizontal line. The signature is stylized and cursive.

SORAYA INDIRA ALBAN MORALES

RESUMEN

En los actuales momentos en que día a día vemos como las industrias tienden a automatizar los procesos de fabricación y a ser más exigentes en su control de calidad, el procedimiento para obtener una pieza pulida con acabado decorativo acorde con las exigencias del consumidor todavía se mantienen en los procesos de pulido manual.

Dada la necesidad de implementar un procedimiento ágil y eficaz en el presente trabajo de tesis se tratara de evaluar las condiciones optimas para el desarrollo en lo posterior del proceso de ELECTROPULIDO DEL BRONCE como metal mas utilizado en los acabados decorativos.

El procedimiento a evaluar se lleva a cabo sumergiendo cada pieza a tratar de dimensiones predeterminadas en un baño electrolítico conteniendo ácido ortofosfórico y ácido crómico disueltos en agua destilada.

En la cuba electrolítica han sido dispuestos 2 placas de plomo las cuales actuarán como catodos, mientras que las piezas a sumergir serán los ánodos. Todos ellos estan conectados a una fuente Transfo-Rectificadora que proveerá de corriente directa al sistema.

Durante el electropulido habrán **parámetros** que se tomarán en cuenta y **controlarán** como son:

- Densidad de Corriente
- Densidad del Electrolito
- Temperatura del baño
- Tiempo de permanencia en el baño

los cuales influenciarán de una u otra **manera** en los **resultados** finales de las piezas a electropulir.

Las probetas así pulidas tendrán brillo, su superficie estará libre de rugosidades y esfuerzos internos sin contar con el poco esfuerzo que conlleva la utilización de este método. *

Para finalizar se hará un examen microscópico y pruebas de rugosidad de las superficies pulidas para evaluar el **nivel** de rugosidad logrado y el brillo obtenido.

INDICE GENERAL

	Pág
RESUMEN	I
INDICE DE GENERAL	II
ABREVIATURAS	III
SIMBOLOGÍA	IV
INDICE DE FIGURAS	V
INDICE DE TABLAS	VI
INTRODUCCIÓN	■
CAPITULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	3
¹ 1.1 DEFINICIÓN DE ELECTROPULIDO	4
1.2 PRIMEROS TRABAJOS EN ESTE CAMPO	5
1.3 PRINCIPIOS DE CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA	10
1.4 FENÓMENO DE LA PASIVACIÓN	15
1.5 FORMACIÓN DE LA CAPA ANÓDICA	19
1.6 PERFIL DE UNA SUPERFICIE .- RUGOSIDAD	22
1.7 MECANISMOS DEL ELECTROPULIDO	25
1.8 FACTORES DE OPERACIÓN	27
1.8.1 DENSIDAD DE CORRIENTE	30

1.8.2 DENSIDAD DEL ELECTROLITO	31
1.8.3 TEMPERATURA DEL BAÑO	33
1.8.4 TIEMPO DE EXPOSICIÓN	34
1.9 EQUIPO Y PROCESO TIPO INDUSTRIAL	35
1.9.1 TANQUE ELECTROPULIDOR	37
1.9.2 CÁTODOS	38
1.9.3 SERPENTINES	39
1.9.4 AGITACIÓN	39
1.9.5 SOPORTES Y BASTIDOR	40
1.9.6 CONTROL DE LA TEMPERATURA	41
1.9.7 GENERADORES Y RECTIFICADORES	41
1.9.8 CORRIENTE DIRECTA	42
1.10 APLICACIONES DEL ELECTROPULIDO	43
1.11 VENTAJAS Y LIMITACIONES	46
1.12 CONDICIONES QUE AFECTAN EL ELECTROPULIDO	48
1.13 FALLAS Y REMEDIOS DURANTE EL PROCESO	49
CAPITULO 2. TRABAJO EXPERIMENTAL Y PRUEBAS	51
2.1 EQUIPO EXPERIMENTAL PARA EL ELECTROPULIDO	52
2.2 SELECCIÓN DEL ELECTROLITO	55
2.3 MATERIALES UTILIZADOS	56

2.4 ESTUDIO DE LAS VARIABLES DEL PROCESO . EFECTO	
 SOBRE LA RUGOSIDAD Y BRILLO DE LA SUPERFICIE	58
 2.4.1 TEMPERATURA	63
 2.4.2 DENSIDAD DE CORRIENTE	63
 2.4.3 TIEMPO DE EXPOSICIÓN	64
 2.4.4 DENSIDAD DEL ELECTROLITO	65
2.5 RESULTADOS OBTENIDOS	67
2.6 ANALISIS METALOGRAFICO DE LAS PIEZAS	86
CAPITULO 3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	90
CAPITULO 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	98
ANEXOS	
REFERENCIAS BIBLIOGRAFÍA	

ABREVIATURAS

A	Amperios
A/dm ²	Densidad de Corriente
°C	Grados centigrados
C.C	Corriente Continua
CuHPO ₄	Hidrofosfato de Cobre
Cu ₃ (PO ₄) ₂	Fosfato Tricuprico
cm	Centimetros
cm ³	Centimetros cubicos
dm ²	Decimetros cuadrados
gr	Gramos
gl	Galón
Hz	Herzt
ISO	International Standar Organization
lb	Libra
lt	Litros
min	Minutos
mm	Milímetros
plg	Pulgadas
Rp	Altura maxima del pico
Rt	Altura máxima del perfil
Ry	Altura de una irregularidad
seg	Segundos
µm	micras
V	Voltios
W	Vatios

SIMBOLOGÍA

Amp	Amperios
C.C	Corriente Continua
D.C	bensidad de Corriente
GI	Galones
Hz	Hertz
mm	milímetros
Rp	Altura maxima del pico
Rt	Altura maxima del perfil
Ry	Altura de una irregularidad
µm	micras
V	Voltaje

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Relacion entre Densidad de Corriente Anddica y Potencial de Electropulido	9
Figura 1.2 Superficie vista a través del microscopio	22
Figura 1.3 Corte transversal de una pieza	23
Figura 1.4 Esquema de las alturas de un perfil y un pico	24
Figura 1.5 Corte de una superficie por planos A y B	25
Figura 1.6 Relacion entre Potencial Anddico y la Densidad de Corriente a 30 °C	29
Figura 2.1 Distribución de la planta Experimental para el Electropulido del Bronce	60
Figura 2.2 Flujograma del proceso de Electropulido del Bronce	61
Figura 2.3 Membrana adhesiva para el método de replicas	67
Figura 2.4 Rugosidad de superficie vs. Tiempo de Exposicion	69
Figura 2.5 Rugosidad de superficie vs. Densidad de Corriente	71
Figura 2.6 Rugosidad de superficie vs. Temperatura del Electrolito	73
Figura 2.7 Rugosidad de superficie vs. Densidad del electrolito	75
Figura 2.8 Rugosidad de superficie vs. Numero de Lija	77
Figura 2.9 Tiempo de Exposicion vs. Rugosidad inicial a 40 A / dm ²	79
Figura 2.10 Tiempo de Exposicion vs. Rugosidad inicial a 20 A / dm ²	81
Figura 2.11 Tiempo de Exposicion vs. Rugosidad inicial a 60 A / dm ²	83
Figura 2.12 Tiempo de Exposicion vs. Densidad de corriente	85
Figura 2.13 Superficie electropulida durante 5 minutos a 40 A / dm ²	86
Figura 2.14 Superficie electropulida a 20 A / dm ²	86
Figura 2.15 Superficie electropulida a 40 A / dm ²	87
Figura 2.16 Superficie electropulida a 60 A / dm ²	87
Figura 2.17 Superficie electropulida a 60 °C de temperatura	88
Figura 2.18 Superficie electropulida con rugosidad inicial de 17.6 micras	88
Figura 2.19 Superficie electropulida con rugosidad inicial de 15.4 micras	89
Figura 2.20 Superficie electropulida con rugosidad inicial de 10 micras	89

INDICE DE TABLAS

	Pág.	
Tabla I	Serie de Fuerzas Electromotrices	14
Tabla II	Relación del tiempo de Electropulido y concentración de ácido	30
Tabla III	Composición del electrolito y condiciones de trabajo para el electropulido del Cobre y sus Aleaciones	32
Tabla IV	Defectos en el electropulido del cobre y sus aleaciones con soluciones H_3PO_4 y CrO_3	50
Tabla IV	Resultados obtenidos variando Tiempo de exposición	68
Tabla V	Resultados obtenidos variando Densidad de Corriente	70
Tabla VI	Resultados obtenidos variando Temperatura del Electrolito	72
Tabla VII	Resultados obtenidos variando Densidad del Electrolito	74
Tabla VIII	Resultados obtenidos variando la Rugosidad inicial	76
Tabla IX	Resultados obtenidos variando la Rugosidad inicial a $40 A / dm^2$	78
Tabla X	Resultados obtenidos variando la Rugosidad inicial a $20 A / dm^2$	80
Tabla XI	Resultados obtenidos variando la Rugosidad inicial a $60 A / dm^2$	82
Tabla XII	Resultados obtenidos variando Tiempo y Densidad de Corriente	84

INTRODUCCIÓN

El objetivo principal del presente trabajo es probar que en determinados casos el pulido electrolítico con corriente continua puede tener potencialmente parecidas posibilidades que el pulido mecánico, con las ventajas adicionales de un menor tiempo y mayor producción en la obtención de superficies metálicas pulidas de alta calidad.

Alin 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 las 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.

Todas las teorías son sin embargo, incapaces de explicar satisfactoriamente en la generalidad de los casos las causas que las originan.

Alin así el principio consiste en hacer pasar corriente eléctrica continua en un **baño electrolítico, en el cual las piezas a tratar actúan como ánodo y que**

por efecto de la disolución anódica las aristas salientes y las protuberancias de la superficie se eliminan, mientras que los valles existentes entre las salientes quedan protegidas de la disolución por los productos de reacción formados y por ellos la velocidad de disolución es menor.

El electropulido entre las ventajas que posee está la alta calidad de las superficies obtenidas, que son comparables con las conseguidas por el pulido mecánico bien hecho.

Entre las desventajas podemos mencionar que no puede disimular grietas profundas, las que no desaparecen con un electropulido normal.

El electropulido encuentra su aplicación principal en la decoración de artículos formados en prensas y en los troqueles, así mismo otra aplicación es la del maquinado porque elimina metal de manera uniforme sin producir tensiones interiores.

Otra aplicación es la preparación de probetas para los procesos de recubrimientos y procesos metalográficos .

CAPITULO I

FUNDAMENTOS TEORICOS.

,

I. FUNDAMENTOS TÉCNICOS

1.1 DEFINICIÓN DE ELECTROPULIDO.

El electropulido se lo 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, con lo que se obtiene un perfil muy llano, o lo que es igual una superficie muy regular. En el electropulido, 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.

Durante el pulido electrolítico no se efectúa en el metal trabajo mecánico alguno, por lo tanto, las superficies electropulidas tienen propiedades únicas y ventajas en relación con el acabado de superficies por la acción cortante y frotante de los abrasivos y herramientas. 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.

1.2 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. El 19 de enero de 1911, E. Y Shpitalskiy (1), que trabajaba en la Universidad de Moscú, obtuvo una patente de " un procedimiento para producir un acabado pulido y brillante en la superficie de los metales y recubrimientos galvánicos " . Un año después fue concedida una patente en Alemania para un proceso análogo.

La patente describe " un procedimiento para dar una apariencia pulida a los metales y recubrimientos galvánicos caracterizada por hecho de que la pieza de metal y objeto recubierto por una capa metálica es sumergido 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,

esfando 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 espontáneo 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 en 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 mate del anodo en una superficie brillante, esta transformación va acompañada, en ciertos casos, por una pulsación de la intensidad de corriente.

Segun Shpitalskiy, " la principal característica distintiva del proceso de electropulido es que esta transformación de la superficie mate del anodo en brillante y pulida ocurre solo en las condiciones especiales descritas anteriormente de polarización anódica del electrodo metal y sólo en una solución de un electrolito (que generalmente forma iones 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 " .

EL ESTUDIO DE JACQUET.

La curva intensidad - potencial en el caso del electropulido del cobre, que fue obtenida mas tarde por Jacquet (2) figura 1 corresponde con la descripción dada por Shpitalskiy. Jacquet da la siguiente explicación del fenomeno correspondiendo a las diferentes partes de la curva intensidad - potencial.

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

La porcion **AB** de la curva corresponde a la disolución normal del anodo. La superficie del metal es mate y cualquier microirregularidad presente en el no desaparece. El emplazamiento exacto del punto **V1** depende en gran manera de la velocidad de incremento del potencial en la porcion **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 practicamente constante.

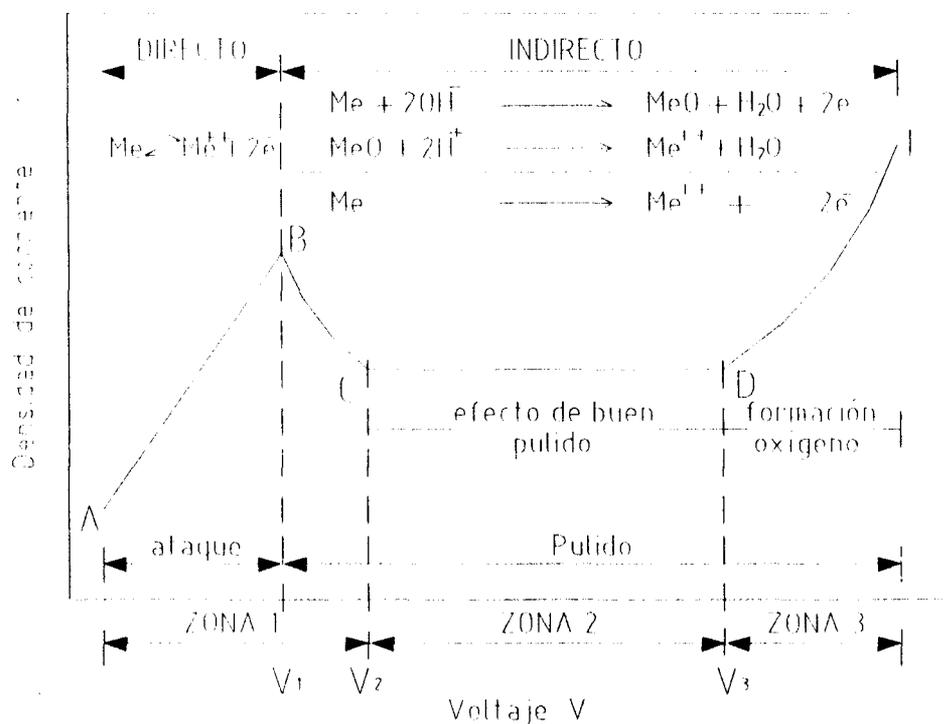


Figura 1.1 Relación entre la Densidad de Corriente Anódica y el Potencial en el Electropulido

En el caso del pulido anódico del cobre la capa de electrolito situada junto al anodo empieza a teñirse de azul. 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 anodo. 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 acompañado 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 .

1.3 PRINCIPIOS DE CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA.

Los metales reaccionan con los elementos no metálicos que se encuentran en su proximidad produciendo compuestos químicos que son óxidos o sales. El carácter de estos compuestos especialmente sus solubilidades en el medio ambiente, su posición respecto a la superficie metálica y sus propiedades físicas ejercen una influencia considerable sobre el curso de estas reacciones. Conocidos corrientemente con el nombre de productos de la corrosión estas sustancias pueden acelerar, impedir o no ejercer ninguna influencia. Por ejemplo, si tales sustancias son muy insolubles y se depositan como películas impermeables en contacto íntimo con la superficie

metálica la reacción de corrosión puede retrasarse o detenerse; si son solubles o no se precipitan en la superficie, la velocidad de corrosión permanecerá inalterable y por último, si tan sólo una parte de la superficie está recubierta con productos de la corrosión, la acción corrosiva puede acelerarse en las zonas descubiertas dando lugar a las llamadas picaduras.

La resistencia a la corrosión relativamente buena de los metales no ferrosos se debe a la naturaleza de las películas superficiales que éstos forman en condiciones normales. Sea como fuere, 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.

Existen dos tipos generales de reacciones de corrosión: aquellas en las que se combina directamente el metal con los elementos no metálicos y aquellas otras en las que el metal se disuelve sustituyendo el hidrógeno del agua o de los ácidos o a otro metal de

las soluciones salinas. El primer tipo, que suele designarse a veces con el nombre de " corrosion **seca** " esta representado por las reacciones de oxidación, halogenación y sulfuración, mientras que el segundo (o de sustitucion) transcurre en presencia de **la** humedad y se designa generalmente con el nombre de " corrosion humeda " .

Ambos tipos de corrosion son de carácter electrolitico y se basa en la formación de pilas locales en la superficie metálica.

Las reacciones de corrosion en un medio acuoso en el que el metal que experimenta sus efectos sustituye al hidrogeno o a otro metal de un compuesto; señalaremos en primer lugar, que en la superficie metalica tienen lugar simultaneamente dos reacciones , en estas los iones metalicos pasan a la solución y los de hidrogeno se escapan de esta para formar gas hidrogeno o para combinarse con el oxigeno atmosferico formando agua. Sin embargo, teniendo en cuenta que los iones son materia y poseen dimensiones es evidente que ambas reacciones no pueden tener lugar en el mismo punto y que deben existir dos tipos de zonas : aquellas en las que el metal se disuelve y aquellas otras en las que los iones de hidrogeno se descargan o se consumen por el oxigeno. Postulando una situación tal como la descrita es necesario suponer que la interfase que media entre un metal y su entorno no es completamente homogenea ya que, se

serlo, no existiría ninguna base para la selección y establecimiento de estos dos tipos de zonas, en otras palabras existen dos tipos de interfase entre el metal y su medio en los que deben existir distintas tendencias de corrosión .

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 electroquímicos 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 de hidrógeno 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.

El fundamento de cualquier tratamiento electroquímico relacionado con la corrosión es forzosamente la " **SERIE DE FUERZAS ELECTROMOTRICES** " , es decir, la clasificación de los elementos de acuerdo con el orden de **sus** tendencias a disolverse .

En la tabla I se pone de manifiesto la posición en dicha serie de los metales mas corrientes .

TABLA I
SERIE DE FUERZAS ELECTROMOTRICES

ELECTRODO	REACCIÓN	POTENCIAL
Oro	Au Au +++	+ 1.36
Cloro	$\frac{1}{2}$ Cl ₂ Cl-	+ 1.358
Plata	Ag Ag+	+0.798
Oxigeno	$\frac{1}{2}$ O ₂ OH -	+0.4
Cobre	Cu Cu++	+0.344
Hidrogeno	$\frac{1}{2}$ H ₂ H+	+0.00
Plomo	Pb Pb++	-0.12
Estaño	Sn Sn++	-0.14
Niquel	Ni Ni++	-0.231
Cadmio	Cd Cd++	-0.401
Hierro	Fe Fe++	-0.441
Cinc	Zn Zn++	-0.762
Aluminio	Al Al+++	-1.69

1.4. FENÓMENO DE LA PASIVACIÓN ANÓDICA

La posibilidad de pasivación del ánodo en el curso de los procesos de electropulido ha sido discutida por muchos investigadores V. I. Layner (5) considera que la base del proceso del electropulido es una pasividad anódica localizada que se presenta como resultado de la concentración de polarización. Tal pasividad de acuerdo con Layner 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. V. Fortunatov y A. V. Finkelshtein (6) han analizado la película negra que cubre la superficie de un ánodo de cobre pulido en una solución de ácido ortofosfórico. Han encontrado que la película consiste en óxido de cobre, hallaron que la superficie del metal debajo de la película estaba parcialmente pulida. Estos investigadores consideran que el proceso de pulido tuvo lugar con la

cooperación de los iones de oxígeno formados como resultado de la descarga de las moléculas de agua en las microproyecciones del ánodo a ciertos potenciales. 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 cobre. El potencial del ánodo alcanza valores en los cuales se hace posible la descarga de las moléculas de agua con la formación como un producto intermedio de iones de oxígeno con una sola carga. Estos últimos reaccionan con el cobre del ánodo para la formación de óxido de cobre. Este proceso ocurre primeramente a la máxima velocidad en las microproyecciones del ánodo.

Los investigadores arriba mencionados consideran el electropulido del cobre como un proceso que implica la formación intermedia de una película de óxido de cobre con la disolución subsiguiente de esta película en el ácido ortofosfórico. La formación en este caso de una capa viscosa de solución constituye solo un fenómeno

secundario que sigue sobre la película de óxido formada directamente en la superficie del metal.

A. I. Levin (7) 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 elevada temperatura en electrolitos más concentrados son relativamente blandas, absorbente 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.

El que las superficies electropulidas sean pasivas depende de la clase de metal y del tipo de solución electropulidora. La pasividad puede ser considerada desde dos puntos de vista:

- aceptación del electrorrecubrimiento con buena adherencia con o sin despasivación.
- mejoramiento de la resistencia al deslustre o a la corrosión .

En particular los baños que contienen ácido crómico ocasionan pasividad en las superficies electropulidas. La resistencia al deslustre y a la corrosión mejoran en forma notable y la superficie necesita ser activada antes del electrorrecubrimiento . 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.

1.5. FORMACIÓN DE LA CAPA ANÓDICA.

W.C. Elmore (3) 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 hidrógeno, 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 contraelectromotriz 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.

COMPOSICIÓN DE LA CAPA ANÓDICA

Prescindiendo de la naturaleza del papel desmepetiado por la capa anódica en el electropulido, su composición química es de considerable interés. K. P. Batashev y E. N. Nikitin(4) 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 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 anodica y despues 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 maxima concentracion de iones de cobre ocurrira en aquellas regiones de la capa anodica en las que las condiciones para la difusion sean mas 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.

Las microproyecciones estando más favorablemente situadas en cuanto a la difusion de los productos de disolución, daran una concentracion inferior de iones de cobre eb las regiones adyacentes de la capa anodica. Como resultado se cubriran con el hidrofosfato de cobre conteniendo iones hidrogeno y teniendo una conductividad mas alta que el fosfato tricuprico.

Corno la fornacion del $\text{Cu}_3 (\text{PO}_4)_2$ continua, la resistencia del recubrimiento anodico en los microfondos aumenta. La formacion del fosfato tricuprico en estas regiones continuará 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 electropulido 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.

1.6 PERFIL DE UNA SUPERFICIE .- RUGOSIDAD

Se entiende por rugosidad como las irregularidades que presenta cualquier superficie . Figura 1.2

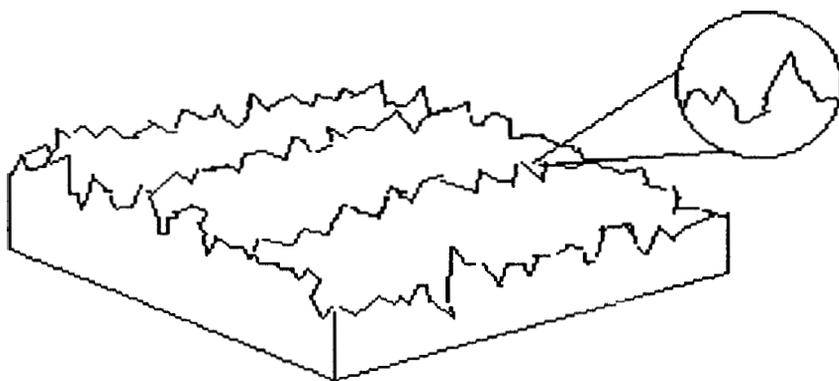


Figura 1.2 : Superficie real vista a través del microscopio

PRINCIPALES PARAMETROS DE UN PERFIL DE RUGOSIDADES

El concepto de rugosidad esta asociado a un parametro tridimensional . Los parametros definidos por las normas ISO se refiere a una sola dimension, a la altura PICO - VALLE . Figura 1.3

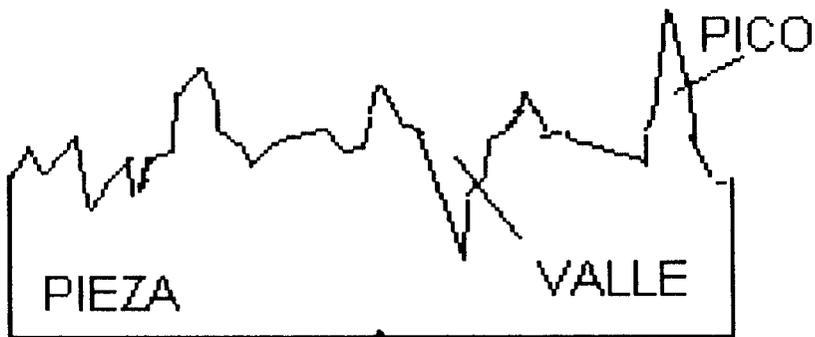


Figura 1.3 : Corte transversal de una pieza donde se muestra los picos y valles

PARAMETROS RELATIVOS A LA ALTURA DE UN PERFIL

ALTURA DE UNA IRREGULARIDAD DE UN PERFIL (R_v)

La altura de una irregularidad de un perfil es la suma de la altura de un pico y la profundidad de un valle . Figura 1.4

ALTURA MÁXIMA DEL PICO (R_p)

La altura máxima del pico R_p es la distancia del punto más alto del perfil a la línea media. Figura 1.4

ALTURA MÁXIMA DEL PERFIL (R_t)

La **altura** máxima del perfil R_t es la distancia vertical entre el pico más alto y el valle más profundo. Figura 1.4



Figura 1.4: Esquema de las alturas de un perfil y un pico

PERFIL TRANSVERSAL.

Un perfil transversal resulta de la intersección de una superficie por un plano A normal a la superficie. Figura 1.5

PERFIL LONGITUDINAL .

Un perfil longitudinal resulta de la intersección de una superficie por un plano B paralelo a la superficie . Figura 1.5

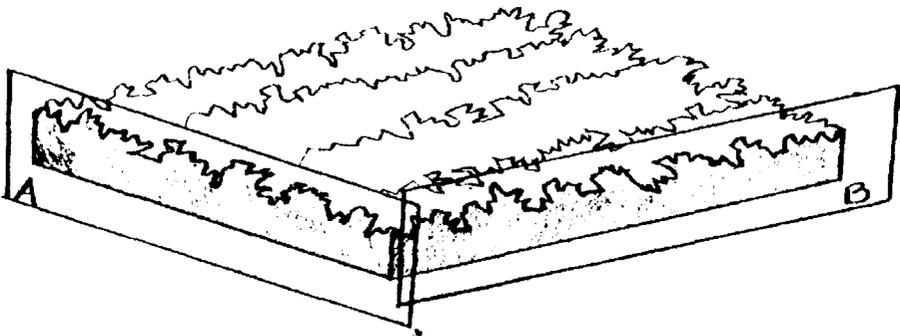


Figura 1.5: Corte de una superficie por los planos A y B.

1.7 MECANISMO DEL ELECTROPULIDO

Muchos investigadores al dar indicaciones 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 anodo durante el tratamiento electrolitico es debido a la diferencia de velocidad de disolucion entre puntas y depresiones, efecto que puede incrementarse por el mayor enriquecimiento de la capa anodica de sales del metal. La capa anodica tiene mayor peso especifico y menor conductividad que el conjunto del electrolito. Con el anodo cubierto por la capa anodica 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 anodica con los productos formados por la disolucion del anodo determina la formación de una película de sales sobre la superficie del anodo. Una película aislante y sin poros interrumpe la corriente; la presencia de poros origina una reducción de la macrodensidad de la corriente y un incremento del voltaje de baño.

1.8. FACTORES DE OPERACIÓN.

Para comprender mejor el proceso del electropulido interesa estudiar los potenciales de anodo del metal que se pule, su magnitud y cambios originados por la naturaleza de los fenómenos que se producen sobre la superficie anodica. Los autores 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 mas extensamente utilizados para el electropulido del cobre y de sus aleaciones estan basados en el acido ortofosforico. V I.Layner investigo el efecto de los distintos factores en el electropulido del cobre afirma que existe una definida relación entre la concentración del ácido ortofosforico 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 .

Figura 1.6

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

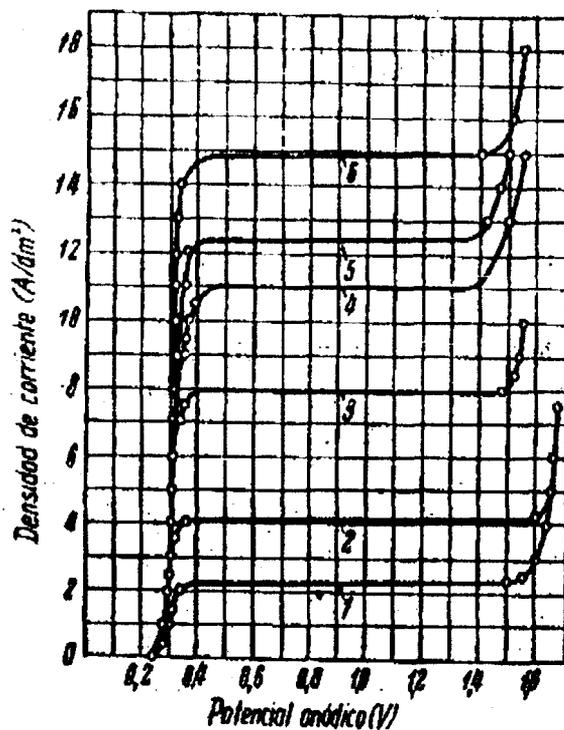


Fig. . Relación entre el potencial anódico y la densidad de corriente en el pulido del cobre en soluciones de ácido ortofosfórico. Temperatura 30 °C.

Peso específico a 15 °C: 1—1,55; 2—1,52;

3—1,4; 4—1,30; 5—1,20; 6—1,10.

Layner da los siguientes datos que relacionan el tiempo de electropulido y la concentración de ácido. Tabla II

TABLA II
RELACIÓN DEL TIEMPO DE ELECTROPULIDO Y
CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO

PESO ESPECIFICO ELECTROLITO A 15°C	DENSIDAD DE CORRIENTE INICIAL (A / dm²)	TIEMPO DE PULIDO (minutos)
1.55	1.5	17
1.50	2.0	13
1.40	3.5	10
1.30	7.5	6
1.20	30.5	4

Cuando mayores son las temperaturas y el removido del electrolito, mayor es la difusión de los productos y mayor es la densidad de corriente del tramo horizontal de curva.

1.8.1 DENSIDAD DE CORRIENTE.-

Como el mejor electropulido se obtiene a una muy determinada densidad de corriente, 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 baño quedan peor pulidas que las de posición vertical incluso pueden mordentarse.

1.8.2 DENSIDAD DEL ELECTROLITO.-

De la tabla III se puede **determinar** que el cobre y el latón se pueden pulir con un electrolito que contenga ácidos crómico y fosfórico. La presencia del ácido crómico altera considerablemente el electropulido, así mientras, que en un electropulido con electrolito a base de ácido ortofosfórico 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 / dm² con desprendimiento de oxígeno incluido. El tiempo de pulido se reduce a 2 - 3 minutos.

TABLA III

**COMPOSICIÓN DEL ELECTROLITO Y CONDICIONES DE TRABAJO
PARA EL ELECTROPULIDO DEL COBRE Y SUS ALEACIONES**

Electrolito	Densidad de Corriente(A/dm ²)	Temperatura °C	Tiempo de Pulido (min)	Material
Acd.ortofosfórico densidad 1.3- 1.4	4 - 8	12 - 25	2 - 8	Cobre
Acd. Ortofosforico densidad 1.6	5 - 20	15 - 25	2 - 5	Cobre Laton
Acd. Ortofosforico 74 acd. Cromico 6 agua 20	30 - 50	20 - 30	2 - 5	Cobre Laton Bronce
Acd.ortofosforico80-88 acd. Cromico 12 agua mas de 8	20 - 25	75 - 80	30 - 60	Cobre Laton
Acd. Ortofosforico densidad 1.5	10 - 15	20 - 25	3 - 5	Bronce

Se han obtenido buenos resultados puliendo cobre, latón, bronce y electrodeposiciones de cobre con soluciones de peso específico 1.60- 1.62 con la siguiente composición en % de peso:

acido ortofosfórico	74
acido cromico	6
agua	20

1.8.3 TEMPERATURA DEL BAÑO.-

Las condiciones de trabajo eran: densidad de corriente anodica 30 - 50 A / dm² , temperatura de la solución 20- **40 °C**, tiempo de pulido 1 - 3 minutos, los catodos eran de plomo. La relación de superficies anodo -cátodo eran 1:2 - 1:3. La distancia entre electrodos 10 - 12 cm. Para preparar la solución el ácido crómico fue disuelto en ácido ortofosfórico, la solución resultante se calentaba a 120 °C para alcanzar si era necesario el peso específico estipulado.

Usando electrolito con ácidos fosfórico y crómico, una densidad de **40 A / dm²** y una temperatura de 20 °C el espesor de cobre disuelto por minuto **es de unas 2.5 micras**.

El factor mas importante para el control, es la viscosidad la cual depende del agua y de la concentracion del metal disuelto, de la relación de los constituyentes activos del baño y de la temperatura. La viscosidad deseada se mantiene por el control apropiado de la concentracion del metal, regulación de la temperatura y ajuste de la densidad. Cuando no hay otro componente volatil que el agua la medición de la densidad es lo unico que se necesita con frecuencia para los baños de electropulido.

La densidad de corriente es por lo general de 10 a 50 A / dm² para la preparacion de superficies y usos decorativos. Para el electrodesbarbado la densidad de corriente varía de 5 a 20A/dm² y para super acabados de superficies y electromaquinado se utiliza entre 50 a 300 A / dm² .

1.8.4 TIEMPO DE EXPOSICIÓN.-

El tiempo de electropulido es en general de 1 a 15 minutos para acabado decorativo y preparacion para recubrimientos electroliticos u otro tipo de acabado. Los amperios - minutos de tratamiento son **mas** 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 mas altos **pero** el tiempo puede acortarse lo suficiente para compensar el **costo** del mayor voltaje.

El voltaje para electropulido es de 6 a 25 voltios dependiendo de la forma de la pieza, distancia del anodo **al** catodo y clase de baño. Con mayor frecuencia se **emplean** de 12 a 17 voltios de corriente continua.

1.9 EQUIPO Y PROCESO TIPO INDUSTRIAL

El equipo y **disposición** para el electropulido generalmente llegan a parecerse a una instalacion de electrorecubrimientos.

La mayor parte del equipo de electropulido **utiliza** materiales estandar de construccion. La instalacion para el electropulido tiene la apariencia a un taller de galvanostegia, **pero** el electropulido tiene **unos** cuantos requisitos especiales.

1. Debido a las densidades de corriente mas elevadas la barra conductora y la estructura de los soportes deben ser mas pesadas y el contacto del soporte a la pieza y del soporte a la barra debe ser firme y positivo.
2. Los refuerzos de los tanques del baño pulidor deben ser más pesados porque estos pesan mucho mas que los baños para depositos electroliticos.
3. La contaminación y las impurezas son un problema mucho menor.
4. La barra de las piezas esta conectada a la terminal de C. C. y los otros electrodos son catodos.
5. Por lo común la conductividad del baño es menor, de manera que los voltajes son mayores y el efecto de calentamiento es mas grande. Estos efectos se contrarrestan por temperaturas de funcionamiento mas elevadas.

1.9.1 EL TANQUE ELECTROPULIDOR,

Para baños ácidos esta forrado por lo común con plomo químico.

También se puede emplear acero inoxidable tipo 317. El líquido de los baños electropulidores pesa de 12 a 16 Lb/gal por lo tanto, los tanques deben ser construidos en forma especial para líquidos tan pesados.

Son hechos de acero inoxidable, acero de bajo carbono, plásticos o fibra de vidrio. Los tanques pueden requerir caucho, polivinil-cloruro, polipropileno o plomo dependiendo del electrolito usado.

Las dimensiones del tanque deberán ser tales que con una hilera de piezas y dos hileras de cátodos la distancia desde los cátodos a los soportes o a las piezas sea de 3 a 7 pulgadas (76 a 158 mm).

La distancia de los cátodos a las paredes del tanque y a los serpentines más la del fondo del tanque a la pieza deberá ser mayor que la distancia de la pieza a los cátodos. Esto evita desviaciones de la corriente al tanque que producirían un electropulido irregular.

La anchura del tanque puede ser como para permitir una fila de piezas y dos filas de catodos o dos filas de piezas y tres catodos. La longitud del tanque debe exceder la necesidad para las piezas colocadas en los soportes y permitir el movimiento de la barra de trabajo.

Las barras que sostienen a los catodos y a las piezas deben estar separadas del tanque por medio de aisladores no absorbentes tales como porcelana, vidrio o fluropolimeros. La madera y los plasticos absorben baño electrolitico y ocasionan cortocircuitos en el tanque.

1.9.2 LOS CÁTODOS

Son tiras planas de cobre, plomo, acero inoxidable o carbon. El material utilizado depende del tipo de baño electrolitico a utilizar.

Los catodos se suspenden de la barra catodica por medio de ganchos parecidos a los empleados para colgar los anodos en los baños electroliticos de recubrimientos. La separación entre los catodos deberá permitir una libre mezcla del baño en la parte de los serpentines de enfriamiento o calentamiento.

1.9.3 LOS SERPENTINES

Estan hechos de acero inoxidable 317 de plomo quimico, poco calor sera necesario para mantener la temperatura de operación si el tanque es trabajado con la cantidad adecuada de A / gl

Los serpentines de enfriamiento y de calentamiento se colocan a los lados del tanque detras de los catodos separados de estos y en una posición que impida convertirse en electrodos bipolares cuando se electropulen las piezas. Se pueden emplear calentadores electricos de inmersión dependiendo de las dimensiones del tanque y de su colocación y de la temperatura de funcionamiento. Los serpentines no deben estar en el fondo del tanque ni donde puedan ser cubiertos por el sedimento.

1.9.4 AGITACIÓN

Cuando se utiliza, la agitación se obtiene por un sencillo movimiento oscilatorio de la barra de trabajo que es el método mas efectivo de producirla para lograr resultados uniformes de

electropulido. La cantidad y relación del movimiento depende del tamaño y forma de la pieza.

La agitación evita corrientes de gas cambiando la dirección de su flujo a través de las superficies de las piezas. La agitación aumenta la velocidad del electropulido acortando así la duración del proceso.

1.9.5 SOPORTES Y BASTIDORES

Los soportes de cobre desnudo dan buen servicio durante largos periodos de operación en baños de ácido sulfúrico o en baños que no contengan ácido crómico. Cuando se necesitan soportes recubiertos los tipos de plastisol dan el mejor resultado.

Las pinzas para sujetar las piezas se hacen de metal para resorte, latón para resortes, bronce comercial o cobre laminado en frío y se les puede reemplazar con facilidad. Si fuese posible, el contacto deberá hacerse en un lugar "protegido" de la pieza a trabajar tal como en una entrante, en el reverso o dentro de un agujero.

1.9.6 CONTROL DE LA TEMPERATURA

Siempre que sea posible la temperatura deberá controlarse en forma automática. Ciertos límites de temperatura son especificados; se necesitan medios calefactores para calentar hasta la temperatura de operación cuando comienza el trabajo y para mantener la temperatura durante el funcionamiento con cargas menores que la capacidad del tanque.

1.9.7 GENERADORES O RECTIFICADORES

Tanto los rectificadores como los generadores de motor pueden emplearse como una fuente de corriente continua para el electropulido.

El voltaje de operación dependerá de :

- la distancia desde los cátodos a la pieza
- el número de A / gal de baño
- la densidad de corriente sobre la pieza para el electropulido
- la densidad de corriente del cátodo
- la temperatura

- la agitación

1.9.8 CORRIENTE DIRECTA

Es suministrada por un rectificador o moto-generador de 12 a 50 V , dependiendo del tamaño de la instalación y electrolito. La resistencia de la solución de electropulido es el factor importante en el voltaje requerido.

La caída de voltaje a través de la solución está en proporción directa a la distancia entre los ánodos y los cátodos.

•

Para instalaciones de 380 - 1.500 Lt. (100 - 400 gal) debe tener un rectificador de 18 V, mientras que 24 V es recomendado para 1.900 - 19.000 Lt. Para aplicaciones superiores a 19.000 Lt. se requiere de 30 a 50 V . El amperaje del electropulido debe ser suficiente para manejar cargas de trabajo de 15 a 50 A / dm² .

Una regla general es la que indica que es necesario 4 Lt. de baño por cada 2 a 4 amperios de corriente que pase a través del electrolito.

1.10 APLICACIONES DEL ELECTROPULIDO

DECORACIÓN

Los artículos formados en prensa de metales laminados en frío son los productos más importantes que se pueden producir en gran escala electropuliéndolos en forma económica para darles una apariencia de calidad. Las *marcas dejadas* por el troquel *no deben* ser más severas que el equivalente de una raspadura hecha con grano de esmeril del N° 180. Las imperfecciones más bastas no desaparecen con una aplicación ordinaria de electropulido. La brillantez y color se logran aun con las marcas del troquel.

Si los troqueles de cortar se mantienen afilados en forma razonable, el electropulido quita también las rebabas producidas por el troquel en los bordes del artículo. Esta es una gran ventaja desde el punto de vista de los ensambladores que podrían de otra forma cortarse con facilidad con los bordes agudos cuya eliminación por procedimientos mecánicos resulta muy costosa.

Los productos de alambre y los artículos igualmente intrincados pueden ser electropulidos para darles mejor apariencia a un costo

mucho mas bajo del que resultaria empleando medios mecánicos para el acabado.

Los artículos de fundicion tienen en general la textura de superficie del molde, esta textura áspera de la superficie no desaparece por una aplicacion practica del electropulido pero puede quedar muy brillante.

PREPARACION PARA EL ELECTORRECUBRIMIENTO

El electropulido es excelente en la preparación de superficie para electrorrecubrimientos. El metal electrodepositado es mas 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 electropulido proporciona “ limpieza mecánica ” para completar la “ limpieza química ” (ausencia de oxidos y compuestos relacionados con el metal) asi como “ limpieza física ” (ausencia de materiales ajenos al metal como grasa, granos de abrasivos, aceites , etc.)

MAQUINADO

Puesto que el electropulido quita metal de manera uniforme, efectúa también una operación de maquinado. Como tal, tiene la gran ventaja práctica de no producir rajaduras por tensión ni deformar los metales endurecidos. Su acción es independiente de la dureza del metal.

Debido a que no deja huellas de trabajo en la superficie ni residuos metálicos, el electropulido proporciona superficies que tienen propiedades metalúrgicas sin igual en las áreas en que el metal frota con metal.

DESBARBADO

Como el electropulido no posee una potencia de depósito perfecta trabaja con mayor rapidez en los bordes y salientes de los bordes. En esta forma es un método para el desbarbado y suavizado de bordes agudos por medio electrolíticos. Para un desbarbado económico la rebaba debe ser relativamente pequeña y uniforme como un borde bien afilado, un borde sin muescas o un ligero corte hecho por una fresa, una herramienta de torno, etc, **pero** que no

haya dejado adherida alguna viruta enroscada; si así fuese se le debe quitar antes aun cuando quede alguna pequeña rebaba.

PREPARACIÓN PARA EL ANODIZADO. RECUBRIMIENTO DE CONVERSION, ETC.

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.

METALOGRAFÍA

El electropulido se utiliza mucho para exámenes metalográficos.

1.11 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 electropulido no sufre la influencia de la dureza o plasticidad de los metales, mientras que con los métodos abrasivos sí se experimentan. Los baños electropulidores son más fáciles de controlar que los recubrimientos metálicos electrolíticos y son menos propensos a la contaminación.

Las principales limitaciones del electropulido 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 electropulido, la "cáscara 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 ultimo puede invertirse usando el electropulido 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 y electrorrecubierta 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 electrorrecubrimientos .

1.12 CONDICIONES QUE AFECTAN EL ELECTROPULIDO

- 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
- "Piel de naranja" de un conformado
- La limpieza de la superficie

1.13 FALLAS Y REMEDIOS DURANTE EL PROCESO .-

La tabla IV describe las particularidades de los principales tipos de defectos, sus causas y formas de corregirlos.

DEFECTOS EN EL ELECTROPULIDO DEL COBRE Y SUS ALEACIONES CON SOLUCIONES DE H₃PO₄ Y Cr₀₃

1

SINTOMAS	CAUSAS	REMEDIO
SUPERFICIE MATE	EXCESIVA CONCENTRACIÓN DE CROMO	SOMETER EL BAÑO A LA OXIDACION DEL CROMO
PULIDO NO UNIFORME	<ol style="list-style-type: none"> 1.- MAL CONTACTO ENTRE PIEZAS Y BASTIDOR ELÉCTRICO. 2.- APANTALLADO DE UNAS PIEZAS SOBRE OTRAS 	<ol style="list-style-type: none"> 1.- MEJORAR EL CONTACTO 2.- ALTERAR LAS POSICIONES
PICADO DE LAS SUPERFICIES ANTES DE USAR LA SOLUCION PARA MAS DE 30AHrs/Lts	<ol style="list-style-type: none"> 1.- TEMPERATURA DE LA SOLUCIÓN DEMASIADA BAJA O ALTA 2.- DENSIDAD DE CORRIENTE ANODICA DEMASIADO BAJA. 3.- LA SOLUCIÓN NO HA SIDO ELECTROLIZADA 	<ol style="list-style-type: none"> 1.- DISMINUIR LA TEMPERATURA DE LA SOLUCIÓN 25 - 30°C 2.- AUMENTARLA CORRIENTE ANÓDICA A 40 - 50 A / dm² 3.- ELECTROLIZAR CON UN ÁNODO DE Cu Y 5 A hrs / Lt
PICADURAS EN LAS DISTINTAS PARTES DE LA SUPERFICIE	<ol style="list-style-type: none"> 1.- LA SOLUCION CONTIENE DEMASIADA AGUA (PESO ESPECÍFICO < 1.6) 2.- DENSIDAD ANÓDICA DEMASIADO BAJA 	<ol style="list-style-type: none"> 1.- CALENTARLA SOLUCION A 120°C HASTX QUE LADENSIDAD SEA 1,6 2.- AUMENTAR LA DENSIDAD A 40-50 A/dm²

CAPITULO II

TRABAJO EXPERIMENTAL Y PRUEBAS

II. TRABAJO EXPERIMENTAL Y PRUEBAS

La parte experimental la podemos dividir en 2 etapas bien definidas : La primera etapa consiste en pulir el bronce haciendo variar los siguientes parametros :

- temperatura
- densidad del electrolito
- densidad de corriente
- tiempo de exposicion

La segunda etapa se refiere al control de la rugosidad de la superficie obtenida con cada uno de los parametros.

2.1 EQUIPO EXPERIMENTAL PARA EL ELECTROPULIDO

FUENTE DE CORRIENTE CONTINUA

Marca	DELTRON HBS
Serie	823391
Voltaje	9V

Corriente **2 - 10 A**

Suministro de
corriente **110V , 60 Hz**

CUBAS

Cantidad **6**

Material **plástico**

Volumen **8 litros**

INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

RELOJ

Marca **HANSA**

Modelo **3Z T003**

MICROSCOPIO METALOGRAFICO

Modelo	OLYMPUS
Serie	PME

MICROMETRO

Marca	KTA - TATOR , Inc
Modelo	109579

CATODO

Material	PLOMO
Forma	RECTANGULAR
Dimensiones	28 x 37 x 8 mm
Cantidad	2

ANODOS

Material	BRONCE COMERCIAL
Forma	RECTANGULAR
Dimensiones	25 x 14,5 x 1,5 mm
Cantidad	55

VARIOS

- 1 Taladro Manual

- 2 clip de lagarto
- 1 extension electrica
- 1 secador eléctrico
- 1 resistencia de 500 W
- alcohol
- algodón
- sellante

2.2 SELECCION DEL ELECTROLITO

El electrolito seleccionado para la prueba depende del metal escogido para la realización de la parte experimental , para el bronce fue seleccionado el baño electrolitico conteniendo acido ortofosfórico , acido crornico y agua destilada ; los porcentajes de participación de los reactivos fueron 74 , 6 y 20 % respectivamente . Cabe anotar que todos estos porcentajes son en peso.

Una vez seleccionado el baño con el que ibamos a trabajar , se definio las dimensiones y la forma que debian de tener las probetas de bronce a fin de obtener la mejor area 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 : 25 x 14,5 x 1,5 mm ; lo que da una area efectiva de trabajo de 0,091 dm²

Otro parametro adicional que sirvio para seleccionar el electrolito fue el rango de trabajo de la densidad de corriente que establecian los investigadores, esto es 30 - 50 A/dm². Por cuestiones de calculo se escogio el valor medio es decir 40 A / dm², con este valor y sabiendo que por cada 2 Amperios de corriente que circule por el baño, se necesita 4 litros de solucion preparada para obtener excelentes resultados, se requirio un recipiente capaz de contener 8 litros de solucion electrolitica .

Una vez conocido el volumen del baño electrolítico se procedio a su preparación; primero se mezclo el dicromato de sodio con agua destilada para obtener acido cromico para finalmente añadir el acido ortofosforico en los porcentajes en peso señalados anteriormente . La solucion asi obtenida fue exotermica y de una coloración verde oscura.

2.3 MATERIAL UTILIZADOS.-

DESCRIPCIÓN.-

La cinta PRESS - O FILM de replica siendo utilizada sobre una superficie limpia, provee una imagen como espejo del perfil. La replica es insertada entre las tenazas del micrómetro para obtener la medida de la rugosidad del perfil de la superficie.

USO.-

- 1.- Escoger la escala (0.8 - 2.0 mils) ó (1.5 - 4.5 mils) de la cinta dependiendo de la profundidad del perfil a ser medido.
- 2.- Remover el papel encerado de la parte posterior de la cinta.
- 3.- Colocar la cinta sobre la superficie limpia teniendo en cuenta que lo adhesivo este hacia abajo.
- 4.- Presione la membrana (designada por el círculo) vigorosamente con la herramienta proveida. Continúe apretando hasta que la membrana se torne uniformemente gris.
- 5.- Remover la cinta y colocar la replica entre las tenazas del micrómetro.
- 6.- El micrómetro leerá después de sustraer 2.0 mils (espesor de membrana no compresible) la rugosidad de la superficie. La cinta debe ser almacenada para futuras referencias.

CALIBRACION.-

La calibración de la cinta es necesaria para esto se debe ajustar entre las tenazas del micrómetro cintas del espesor predeterminado y la escala de la caratula inicializar en cero la lectura así registrada deberá ser la misma que la cinta de calibración.

CUIDADOS.-

- 1.- Si la superficie no esta limpia la lectura del perfil será incorrecta.
- 2,. La cinta no debera ser utilizada para perfiles menores a 0.8 mils, así por ejemplo sobre platos de vidrio o un espejo.

2.4 ESTUDIO DE LAS VARIABLES DE PROCESO. EFECTO SOBRE LA RUGOSIDAD Y BRILLO DE LA SUPERFICIE

Empleando el bronce comercial para la parte experimental se obtuvieron probetas rectangulares de 25 x 14.5 x 15 mm , dimensiones necesarias para mantener una área efectiva de 0.091 dm² .

Fue necesario un volumen aproximado de 8 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 80 mm . Las probetas y los cátodos fueron conectados al rectificador por medio de cables y tornillos, los cables eran de cobre recubiertos de plástico para evitar el ataque químico durante la operación.

Las piezas y los cátodos fueron sujetados a la barra de cobre por medio de las pinzas de lagarto los mismos que permitían mantener la distancia necesaria entre cada elemento .

El proceso no es exotérmico por lo que no fue necesario utilizar algún tipo de refrigerante que pudiera alterar la densidad del electrolito.

La corriente de trabajo fue medida directamente en la fuente 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 siguiente proceso fue seguido durante el electropulido . figura 2.1 y 2.2.

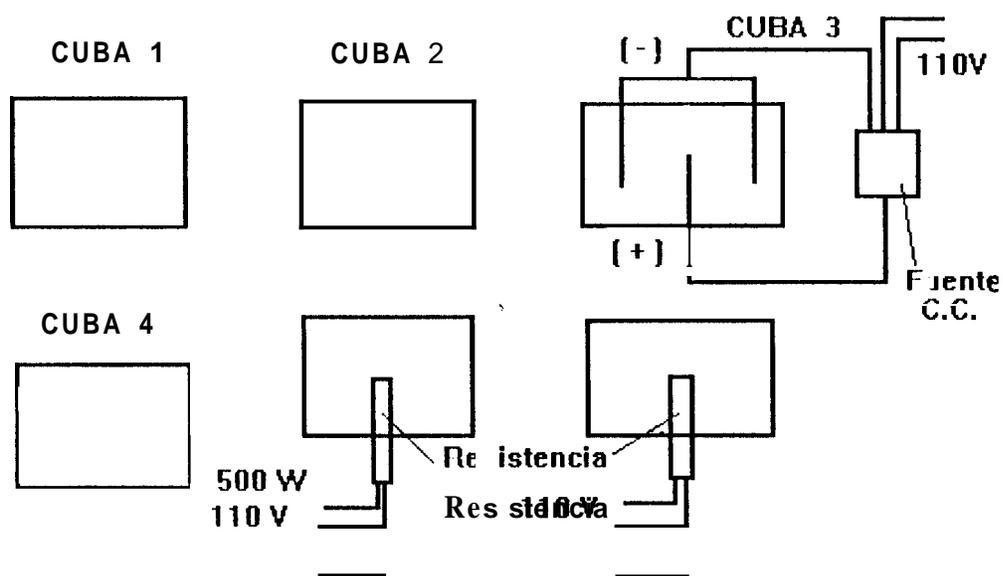


Figura 2.1 Distribución de la Planta Experimental para el Electropulido del Bronce

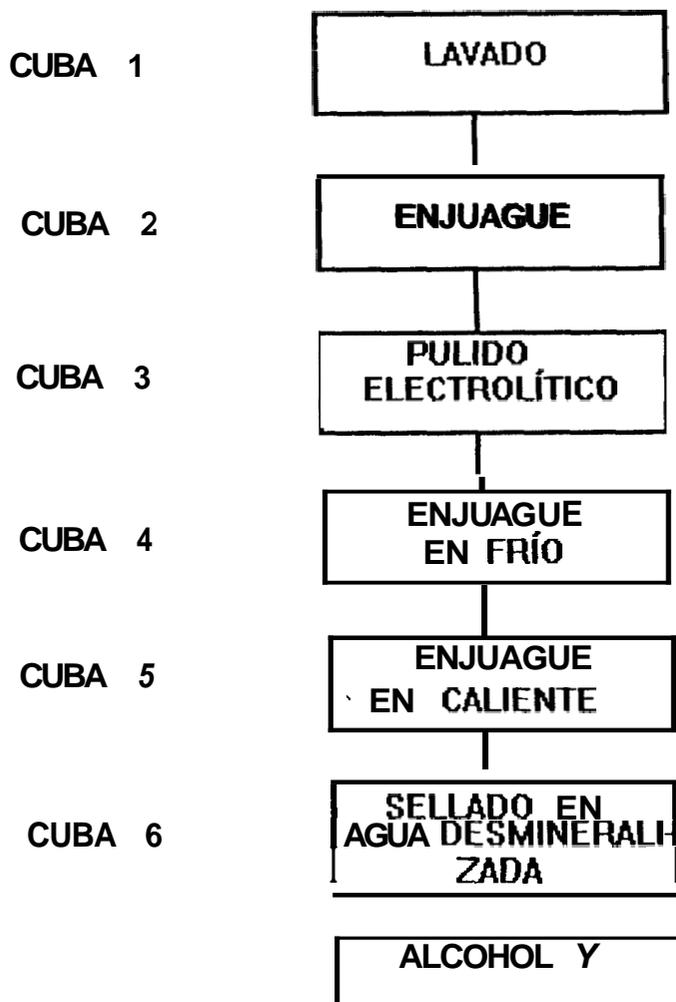


Figura 2.2 Flujoograma del Proceso de Electropulido del Bronce

- 1.- Lavado : de la probeta utilizando detergente y agua corriente a temperatura ambiente
- 2.- Enjuague : de la probeta con agua corriente a temperatura ambiente
- 3.- Pulido electrolítico : en ácido ortofosfórico, ácido crómico disueltos en agua desmineralizada y con los parámetros de trabajo.
- 4.- Enjuague en frío: con agua corriente a 10 °C durante 1 minuto.
- 5.- Enjuague en caliente : con agua corriente a 80 °C durante 1 minuto
- 6.- Sellado : en agua desmineralizada a 100°C y durante 3 minutos .
- 7.- Paso por un chorro de alcohol.
- 8.- Secado : con una corriente de aire caliente o con algodón.

En la parte preliminar del trabajo experimental se puede hacer variando los parámetros de temperatura , densidad del electrolito, densidad de corriente y tiempo de exposición. A continuación se da un detalle de cada uno de ellos.

2.4.1 TEMPERATURA

Para evaluar los efectos provocados por la temperatura sobre la rugosidad y el brillo , se procedio a calentar el baño electropulidor sumergiendo una resistencia de 500 W , la temperatura se controló por medio de un termometro de mercurio.

Las siguientes condiciones fueron mantenidas:

Densidad de corriente	40 A / dm²
Densidad del electrolito	1,60 gr / cm ³
Tiempo de exposicion	180 segundos
Temperatura	variable: 25 -30 - 40 -50 -60°C

2.4.2 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 amperimstro con cada una de las probetas a electropulir .

Por lo tanto las siguientes condiciones fueron mantenidas durante el ensayo:

Temperatura	25 °C
Tiempo de exposicion	180 segundos
Densidad del electrolito	1,60 gr / cm ³
Densidad de Corriente	variable: 10 - 30 - 40 - 50 60 A / dm ²

2.4.3 TIEMPO DE EXPOSICIÓN

Otro parametro para evaluar el comportamiento de la rugosidad y brillo de las probetas tratadas con el electropulido fue el tiempo de exposicion o el tiempo necesario para alcanzar condiciones de un buen acabado decorativo y minima rugosidad; para esto se requirio de probetas electropulidas a diferentes tiempos y con las siguientes condiciones de ensayo:

Temperatura	25 °C
Densidad del electrolito	1,60 gr / cm ³
Densidad de Corriente	40 - 20- 60 A / dm ²
Tiempo de exposicion	variable: 30 - 450 segundos

2.4.4 DENSIDAD DEL ELECTROLITO

Para evaluar los efectos sobre la superficie y brillo de las probetas que tiene la densidad del electrolito, se procedio a ir agregando agua destilada al batio electropulidor y controlandolo a traves del densiometro; para no variar el volumen del batio fue necesario ir desalojando pequeños volumenenes que luego fueron reemplazados por un volumen igual de agua destilada hasta obtener la densidad requerida para efectuar la prueba . Los demas parametros de ensayo fueron mantenidos.

Temperatura	25 °C
Densidad de Corriente	40 A / dm ²
Tiempo de exposicion	180 segundos
Densidad del electrolito	variable: 1,60 - 1,55 - 1,50 - 1,40 - 1.20 - 1,0 gr / cm ³

RUGOSIDAD INICIAL

Se procedio a lijar las probetas con un numero de lija que van desde 220 hasta 1000 para partir de una rugosidad inicial , luego se las electropulieron en condiciones estables y finalmente se

midio su rugosidad final para evaluar el cambio experimentado por cada una de ellas.

Las condiciones estables fueron:

Temperatura	25 °C
Tiempo de exposicion	180 segundos
Densidad de corriente	40 A / dm ²
Densidad del electrolito	1,60 gr / cm ³

MEDICIÓN DE RUGOSIDAD DE SUPERFICIE

Para la medición de las rugosidades finales de las probetas electropulidas , se utilizó el método de replicas que consiste en una fina membrana adhesiva que se coloca sobre la superficie a analizar , en esta quedan marcadas en alto y bajo relieve todas las irregularidades e imperfecciones del perfil de la superficie de las probetas.

Una vez obtenidas las huellas se coloca la membrana entre las puntas del tornillo micrométrico el cual nos dara una lectura en su caratula en Mils (1 mils = 25,4 μm).

A la lectura obtenida en el micrometro se le debe reducir 2 mils = 50,8 μm debido al espesor de la membrana .

Figura 2.3.

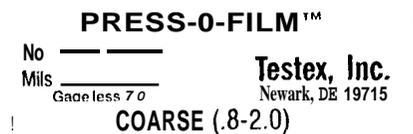


Figura 2.3: Membrana adhesiva para el método de réplicas

2.5 RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación presentaremos valores tabulados de acuerdo a la variación de cada uno de los parametros .

TABLA IV

RESULTADOS OBTENIDOS VARIANDO EL TIEMPO DE EXPOSICIÓN

TIEMPO (segundos)	RUGOSIDAD (micras)
60	14
150	12.5
180	10
240	10.8
270	11.3
300	13
360	15.6

CONDICIONES DE ENSAYO :DENSIDAD DE CORRIENTE 40 A / dm²

TEMPERATURA 25 °C

DENSIDAD DE ELECTROLITO 1.6gr / cm³

RUGOSIDAD DE SUPERFICIE VS. TIEMPO DE EXPOSICIÓN

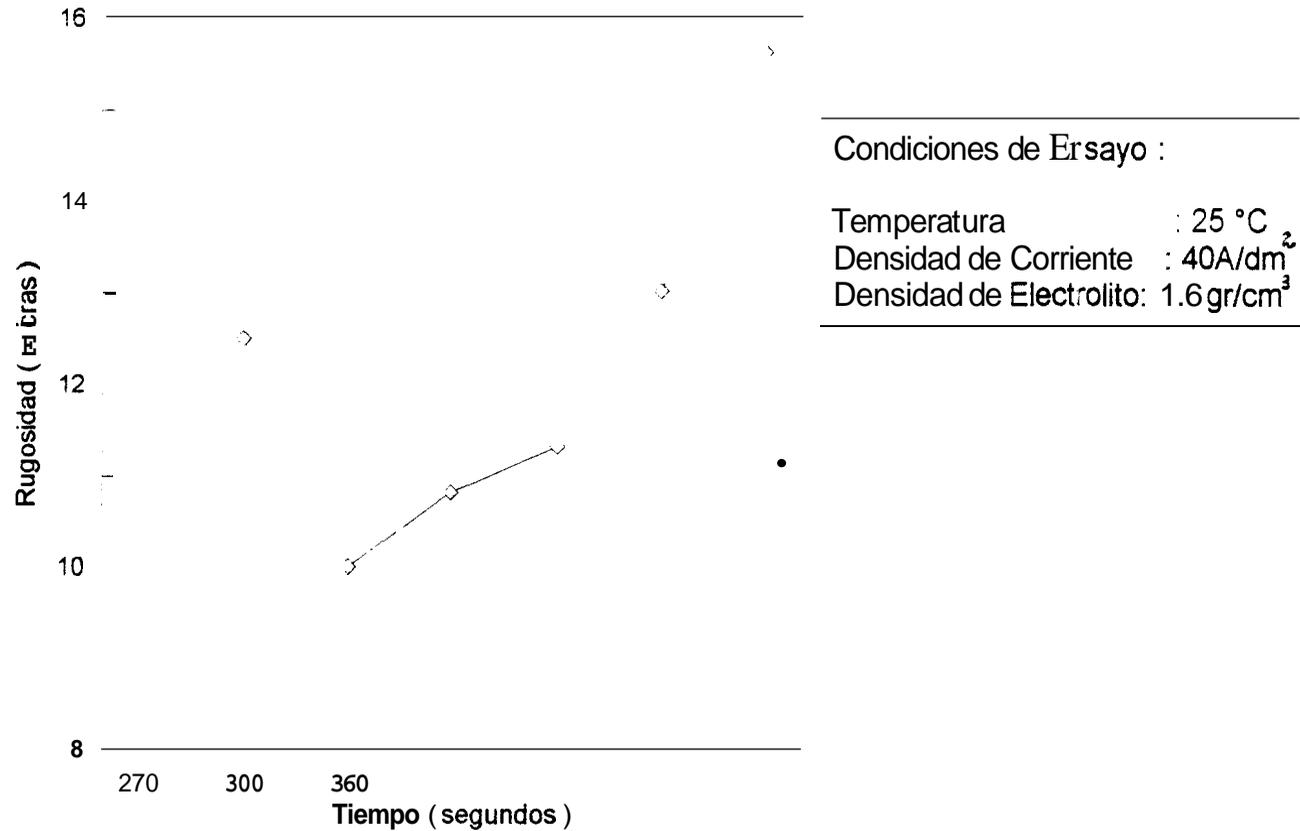


Figura 2.4 : Efecto del Tiempo de exposicion sobre la rugosidad de la superficie

TABLA V

**RESULTADOS OBTENIDOS VARIANDO LA DENSIDAD DE
CORRIENTE**

DENSIDAD DE CORRIENTE A/dm²	RUGOSIDAD (micras)
10	14
30	12.8
40	10.7
50	12
60	15.2

CONDICIONES DE ENSAYO:

TEMPERATURA

25 °C

TIEMPO DE EXPOSICIÓN

180 segundos

DENSIDAD DEL ELECTROLITO

1.6gr / cm³

RUGOSIDAD DE SUPERFICIE VS. DENSIDAD DE CORRIENTE

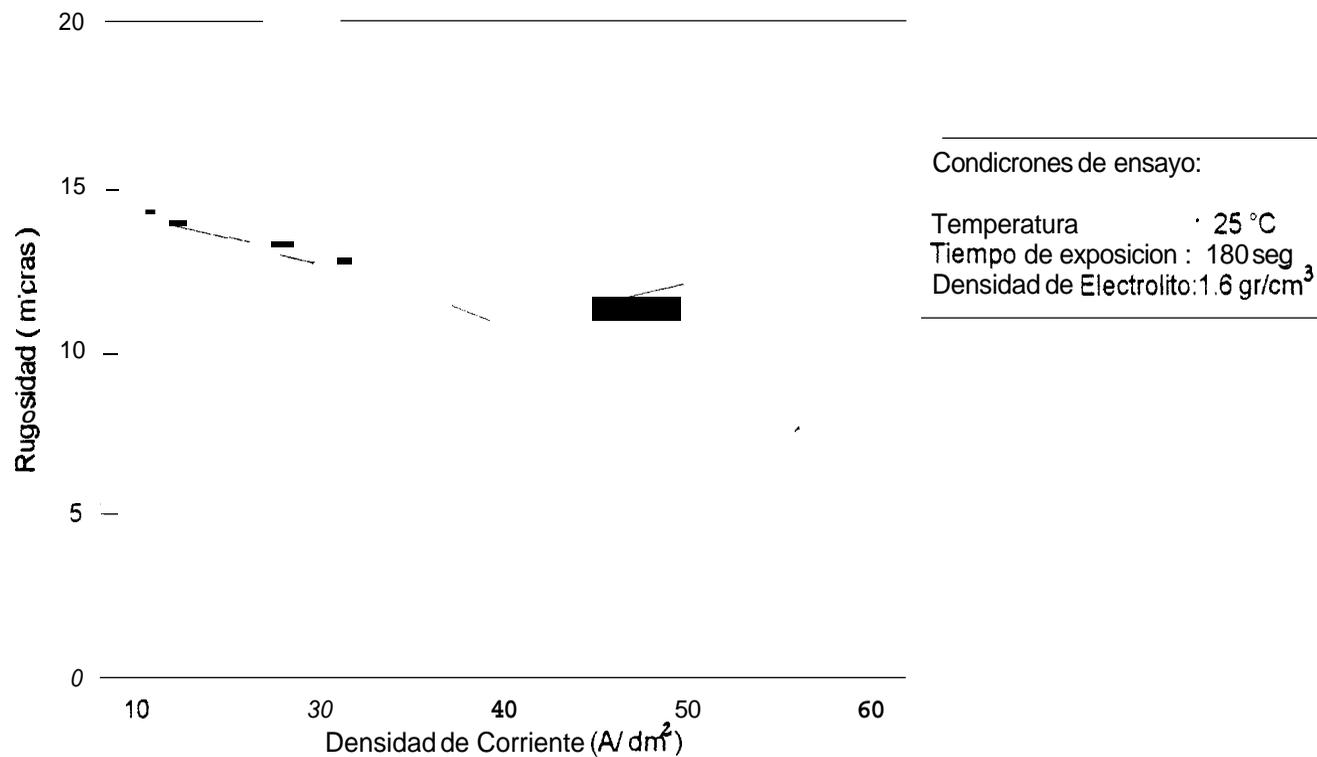


Figura 2.5 : Efecto de la Densidad de Corriente sobre la rugosidad de la superficie (micras)

TABLA VI

RESULTADOS OBTENIDOS VARIANDO LA TEMPERATURA DEL
ELECTROLITO

TEMPERATURA °C	RUGOSIDAD (micras)
25	10.3
30	11
40	11.3
50	11.7

CONDICIONES DE ENSAYO:

DENSIDAD DE CORRIENTE	40 A / dm ²
TIEMPO DE EXPOSICIÓN	180 segundos
DENSIDAD DEL ELECTROLITO	1.6 gr / cm ³

RUGOSIDAD DE SUPERFICIE VS. TEMPERATURA DEL ELECTROLITO

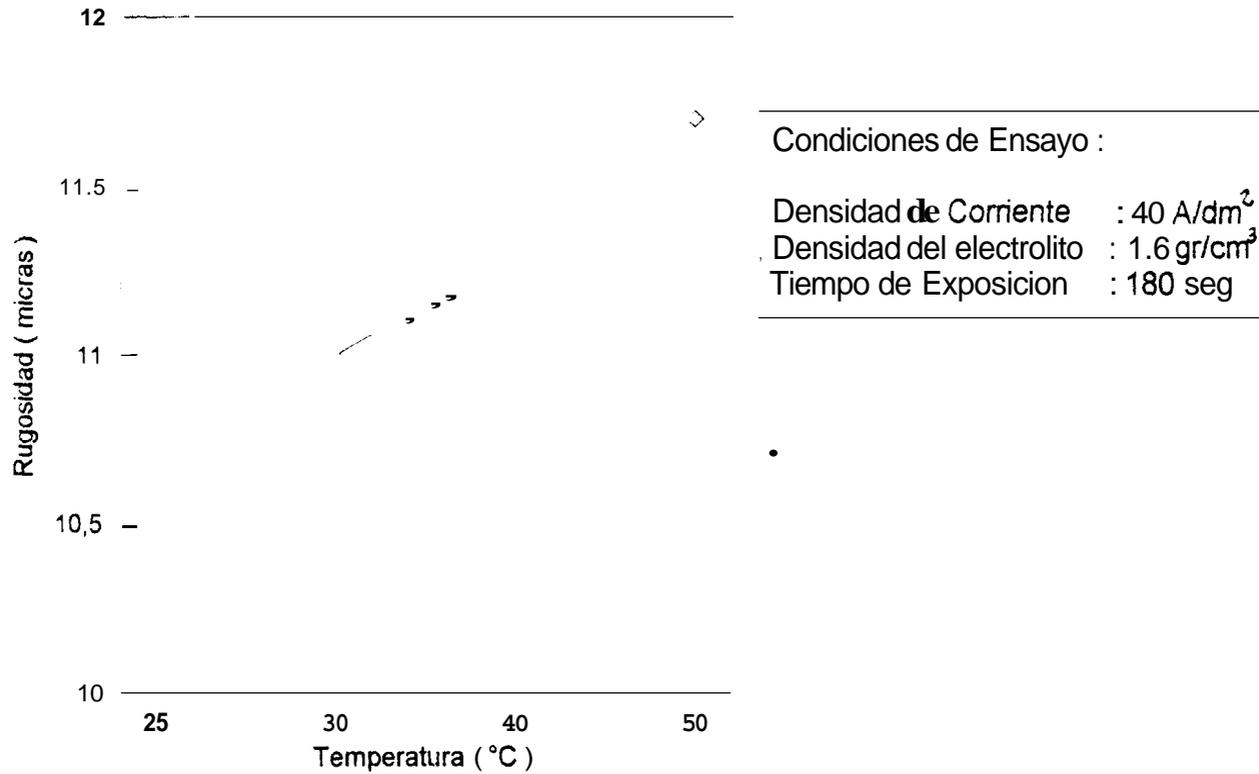


Figura 2.6 : Efecto de la Temperatura del Electrolito sobre la rugosidad de la superficie (micras)

TABLA VII

**RESULTADOS OBTENIDOS VARIANDO LA DENSIDAD DEL
ELECTROLITO**

DENSIDAD DEL ELECTROLITO (gr/cm³)	RUGOSIDAD (micras)
1.60	10.3
1.55	11.5
1.50	12
1.40	12.8
1.20	13.1
1.00	13.3

CONDICIONES DE ENSAYO:

DENSIDAD DE CORRIENTE	40 A/dm ²
TEMPERATURA	25 °C
TIEMPO DE EXPOSICIÓN	180 segundos

RUGOSIDAD DE SUPERFICIE VS. DENSIDAD DE ELECTROLITO

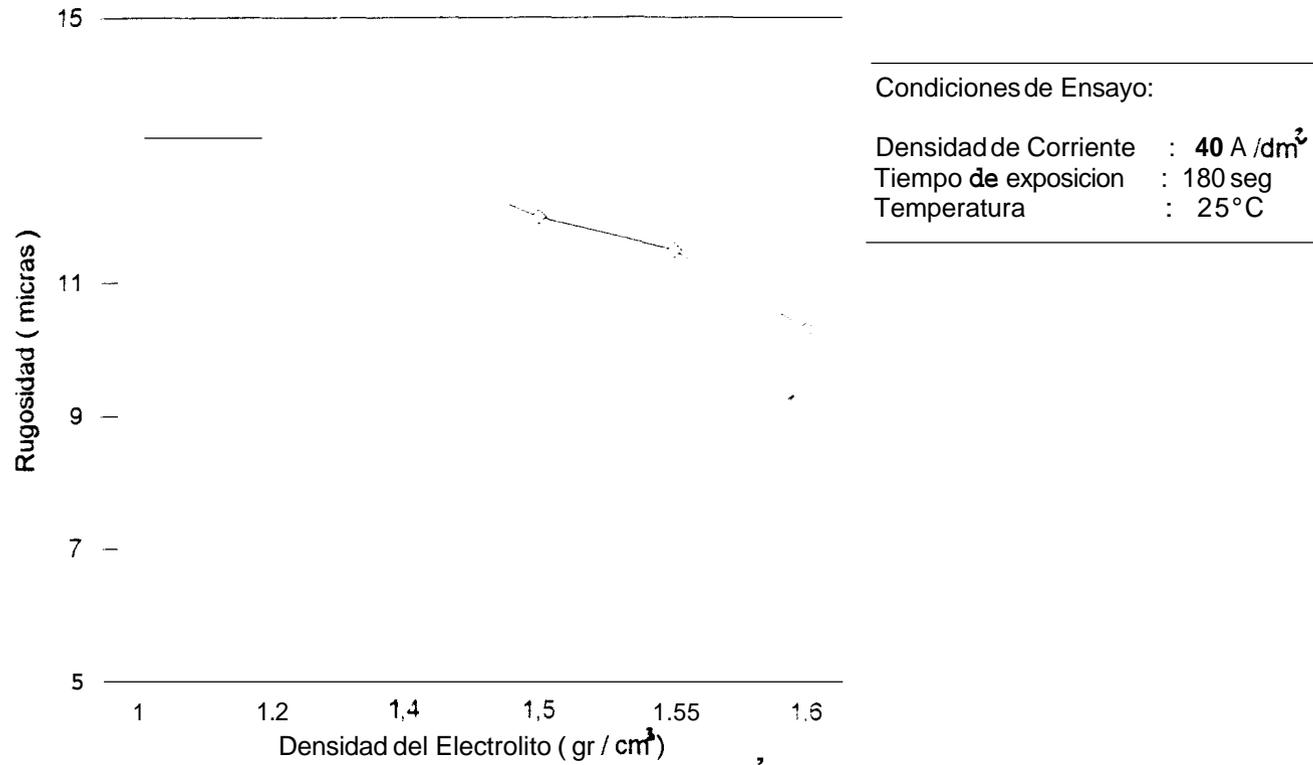


Figura 2.7 : Efecto de la Densidad del Electrolito sobre la rugosidad de la superficie (micras)

TABLA V III

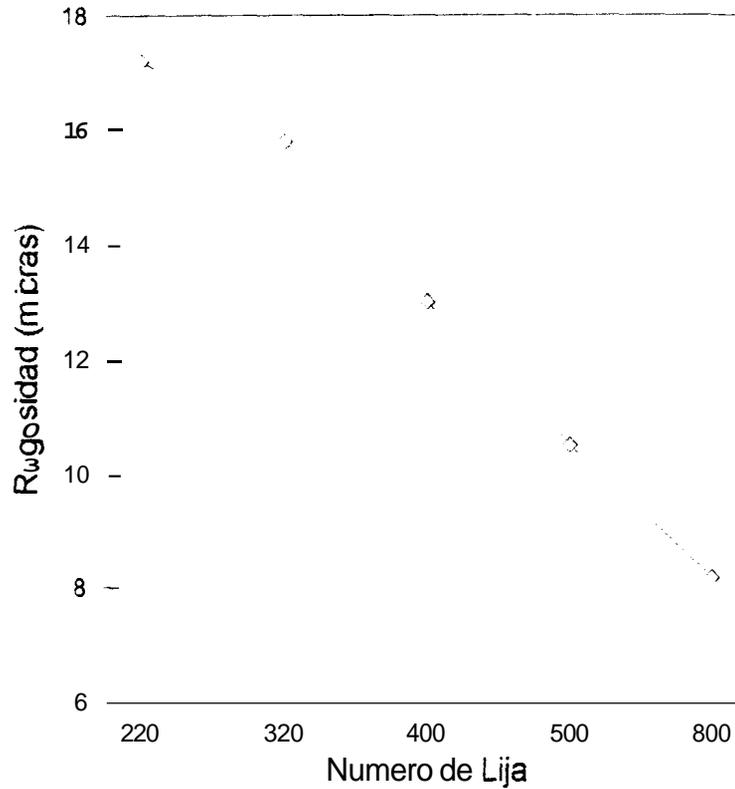
RESULTADOS OBTENIDOS VARIANDO LA RUGOSIDAD INICIAL

NUMERO DE LIJA		RUGOSIDAD
#)	(micras)
	(17.6)	17.2
320	(16.5)	15.8
400	(15.4)	13.0
500	(13.8)	10.5
800	(10)	8.2

CONDICIONES DE ENSAYO:

DENSIDAD DE CORRIENTE	40 A / dm ²
DENSIDAD DEL ELECTROLITO	1.60gr / cm ³
TEMPERATURA	25 °C
TIEMPO DE EXPOSICIÓN	180 segundos

RUGOSIDAD DE SUPERFICIE VS. NUMERO DE LIJA



Condiciones de Ensayo:

Densidad de Corriente : 40 A/dm^2

Tiempo de Exposición : 180 seg

Densidad del Electrolito: 1.6 gr/cm^3

Temperatura : 25°C

Figura 2.8 : Efecto del tamaño de grano del numero de lija sobre la rugosidad de la superficie

TABLA IX

RESULTADOS OBTENIDOS VARIANDO LA RUGOSIDAD INICIAL

NUMERO DE LIJA		TIEMPO DE
# SIC	micras	EXPOSICIÓN
		(segundos)
220	(17.6)	390
320	(16.5)	330
400	(15.4)	240
600	(13)	150
800	(10)	60
1000	(7.8)	30

CONDICIONES DE ENSAYO:

DENSIDAD DE CORRIENTE	40 A / dm ²
DENSIDAD DEL ELECTROLITO	1.6 gr / cm ³
TEMPERATURA	25 °C

TIEMPO DE EXPOSICIÓN VS. RUGOSIDAD INICIAL

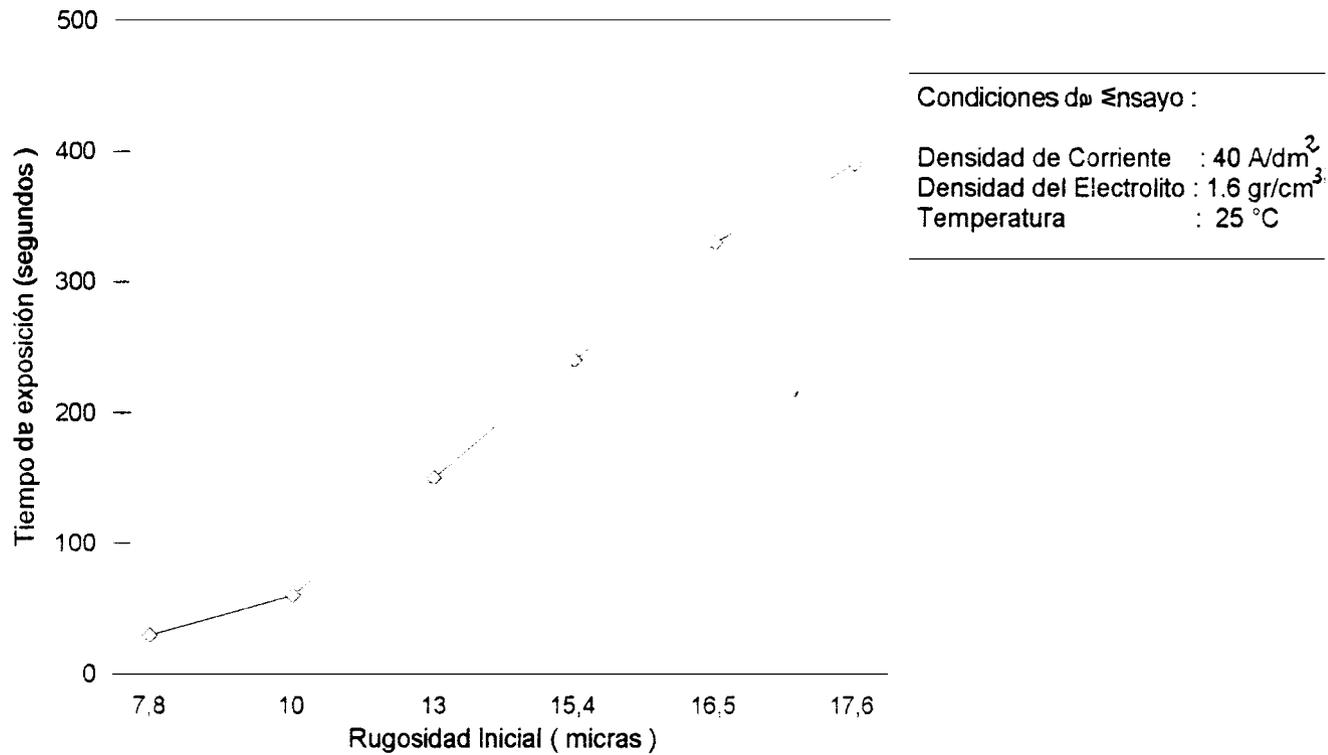


Figura 2.9 : Efecto de la Rugosidad inicial de las probetas sobre el tiempo de exposición a 40 A / dm²

TABLA X

RESULTADOS OBTENIDOS VARIANDO LA RUGOSIDAD INICIAL

NUMERO DE LIJA		TIEMPO DE EXPOSICIÓN (segundos)
# SIC	micras	
220	(17.6)	450
320	(16.5)	390
400	(15.4)	270
600	(13)	225
800	(10)	105
1000	(7.8)	90

CONDICIONES DE ENSAYO:

DENSIDAD DE CORRIENTE	20 A /dm ²
DENSIDAD DEL ELECTROLITO	1.6gr / cm ³
TEMPERATURA	25 °C

TIEMPO DE EXPOSICION VS. RUGOSIDAD INICIAL

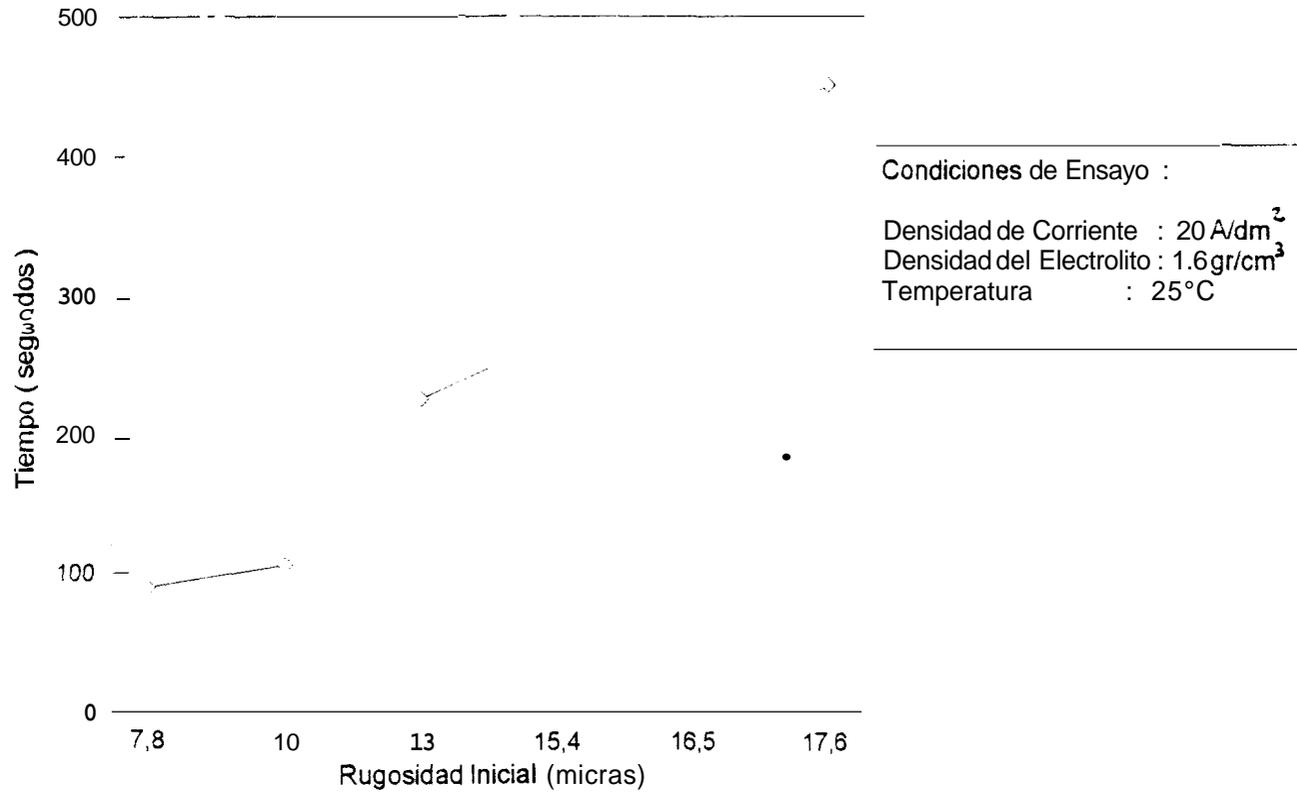


Figura 2.10 : Efecto **de** la rugosidad inicial de las probetas sobre el tiempo **de** exposicion a 20 A / dm^2

TABLA XI

RESULTADOS OBTENIDOS VARIANDO LA RUGOSIDAD INICIAL

NUMERO DE LIJA		TIEMPO DE EXPOSICIÓN
# SIC	micras	(segundos)
220	(17.6)	330
320	(16.5)	270
400	(15.4)	195
600	(13)	105
800	(10)	45
1000	(7.8)	30

CONDICIONES DE ENSAYO:

DENSIDAD DE CORRIENTE	60 A / dm ²
DENSIDAD DEL ELECTROLITO	1.6 gr / cm ³
TEMPERATURA	25 °C

TIEMPO DE EXPOSICIÓN VS RUGOSIDAD INICIAL

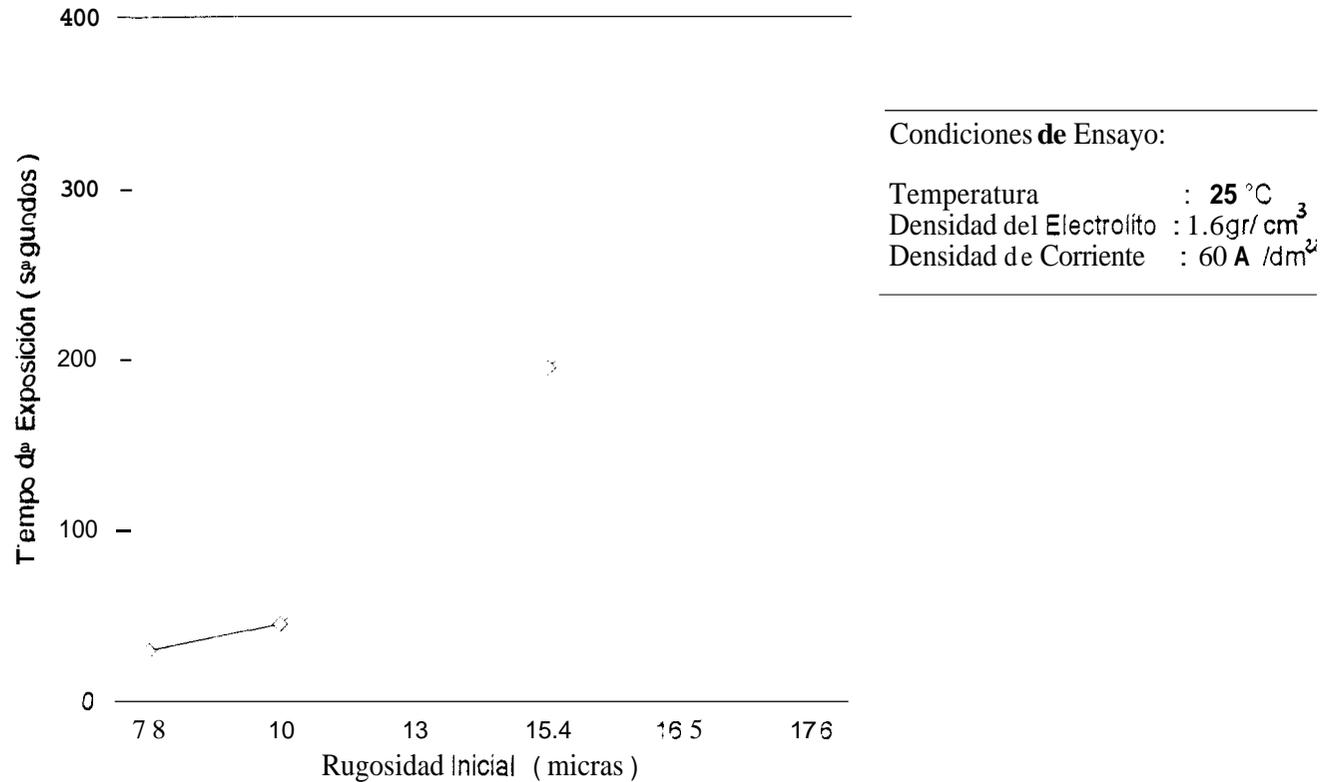


Figura 2.11 : Efecto de la Rugosidad inicial sobre el tiempo de exposición a 60 A / dm²

TABLA XII

**RESULTADOS OBTENIDOS VARIANDO TIEMPO Y DENSIDAD DE
CORRIENTE**

DENSIDAD DE CORRIENTE (A /dm²)	TIEMPO (segundos)
10	270
30	240
40	180
50	150
60	60

CONDICIONES DE ENSAYO:

TEMPERATURA	25 °C
DENSIDAD DEL ELECTROLITO	1.6 gr / cm ³
RUGOSIDAD INICIAL	15.4 micras

TIEMPO DE EXPOSICION VS. DEWSIDAD DE CORRIENTE

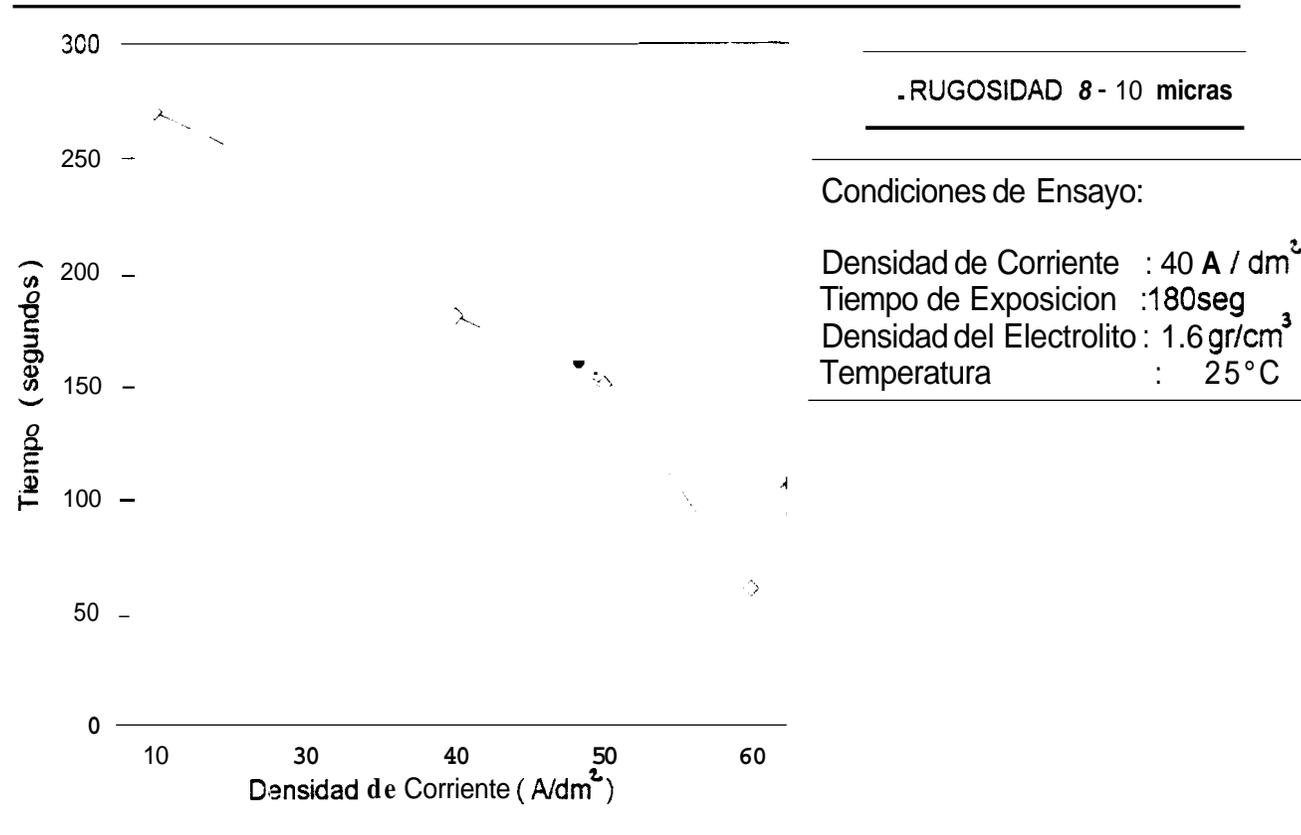


Figura 2.12: Efecto de la Densidad de Corriente sobre el tiempo de exposicion para una rugosidad de 8 - 10 micras

2.6 ANALISIS METALOGRÁFICO DE LA PIEZAS

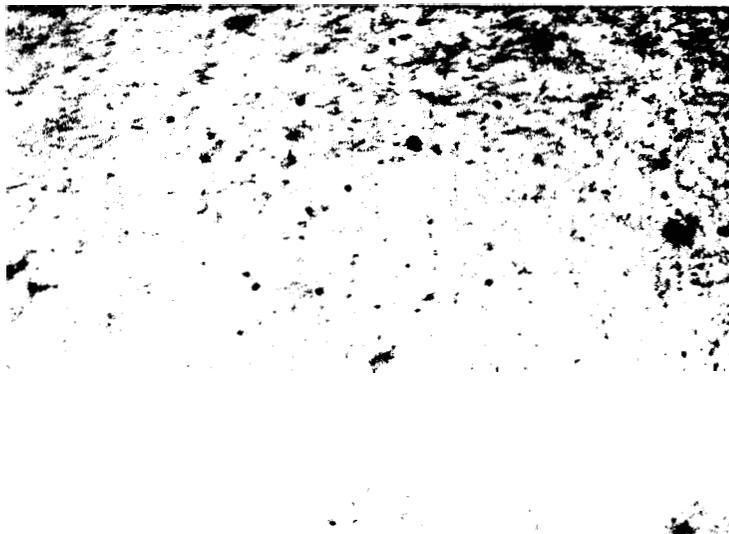


Figura 2.13 Superficie electropulida durante 5 minutos a 40 A / dm^2 10X

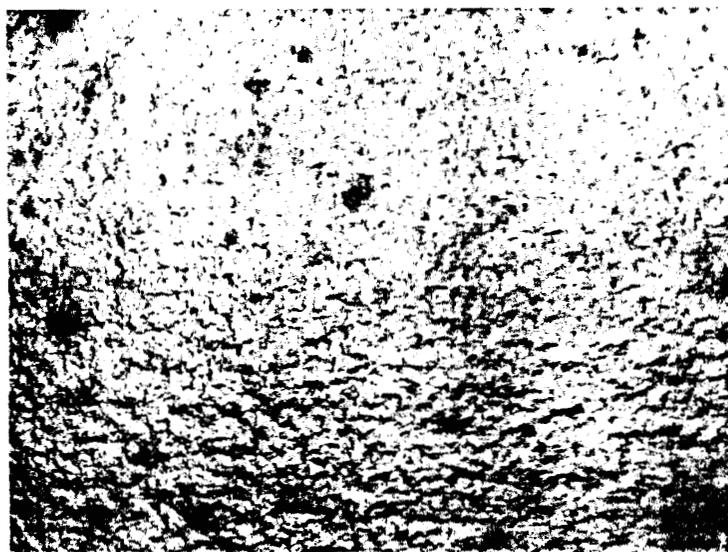


Figura 2.14. Fotografía de la superficie electropulida a 20 A / dm^2 10X

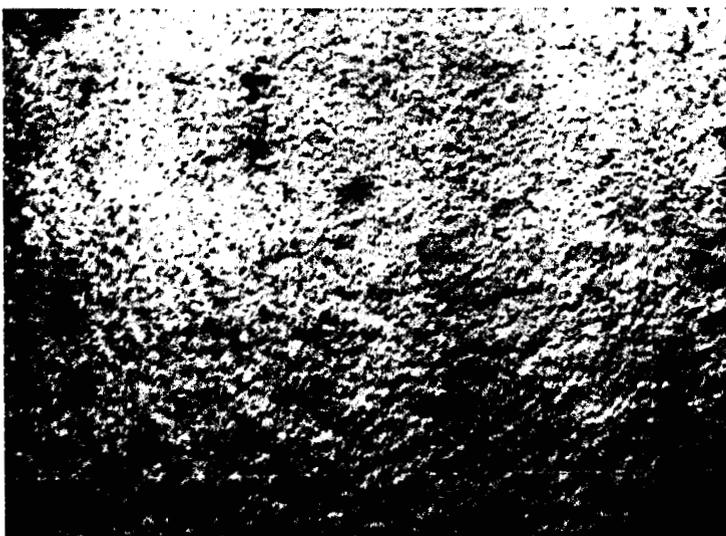


Figura 2.15. Superficie electropulida a 40 A / dm² 10X.

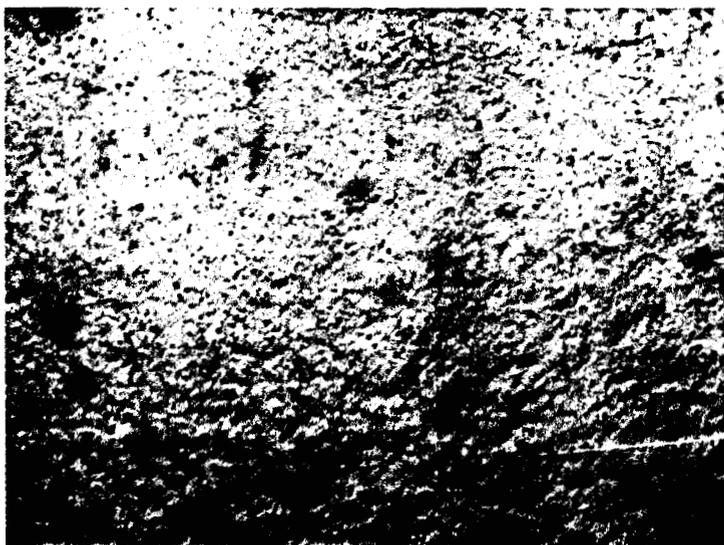


Figura 2.16 Superficie electropulida a 60 A / dm² 500 X

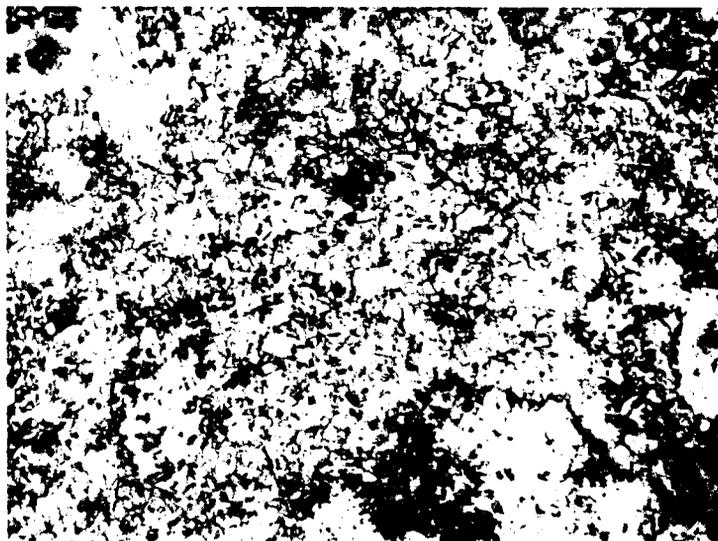


Figura 2.17 Superficie electropulida a 60 °C 11.3X.

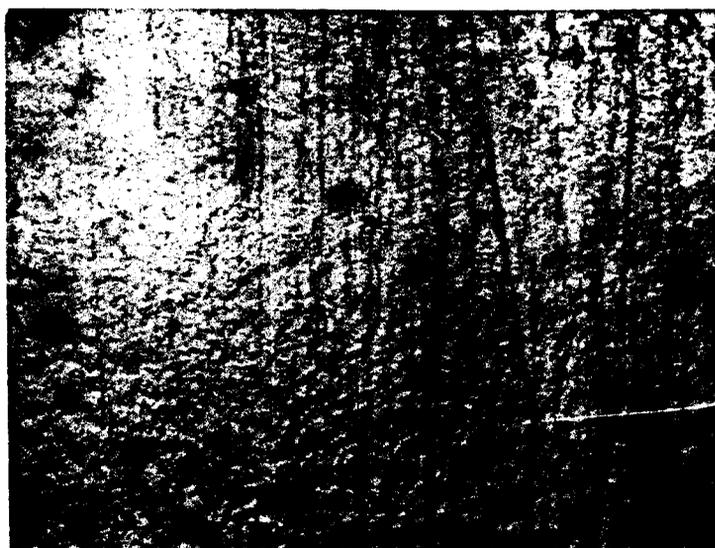


Figura 2.18 Superficie electropulida con rugosidad inicial de 17.6 micras (lija # 220)

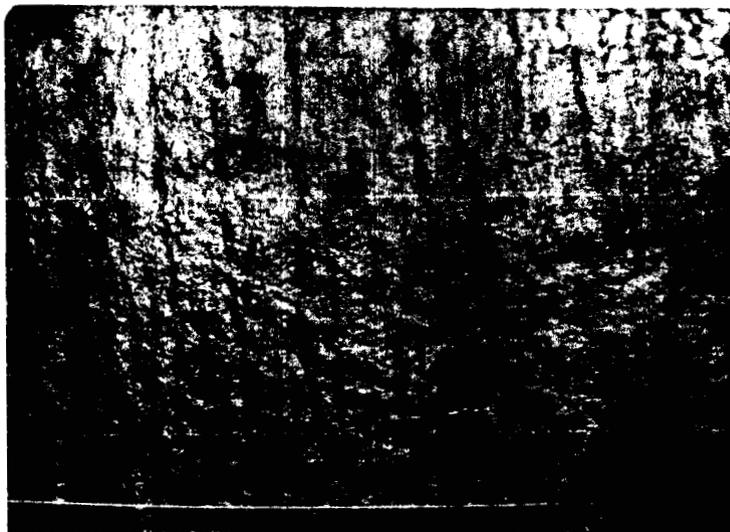


Figura 2.19 Superficie electropulida con rugosidad inicial de 15.4 micras (lija # 400).



Figura 2.20 Superficie electropulida con rugosidad inicial 10 micras (lija # 800).

CAPITULO III
DISCUSIÓN DE
RESULTADOS

III. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Para evaluar el efecto que tiene el tiempo de exposición sobre la rugosidad de superficie nos basaremos en la figura 2.4 , 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 segundos comprendidos dentro del rango 180 - 240 segundos es donde se pudo lograr una rugosidad aceptable, mas allá de estos valores tanto disminuyendo como aumentando los tiempos provocan una mayor rugosidad.

Por el contrario, si analizamos la apariencia brillante de una probeta pulida con tiempos mayores al rango nos damos cuenta que esta logra brillo llamativo pero su rugosidad no es aceptable debido al tiempo que se la tuvo expuesta al baño electropulidor. Figura 2.13.

El grafico de la figura 2.5 y su correspondiente tabla V nos permite analizar el comportamiento de la rugosidad de la superficie cuando se varia la densidad de corriente, teniendo como resultado que la rugosidad decrece a medida que se acerca al valor de 40 A / dm^2 , valor en el que se obtiene la minima rugosidad, pero ésta vuelve a incrementarse cuando se

sigue aumentando la densidad de corriente . Además podemos determinar la zona en la que se obtiene un buen acabado así como la zona en la que comienza a aparecer picaduras de corrosión y la zona al inicio del proceso en la que la superficie se presenta mate, esta marcación de zonas obedece a que se trabaja con densidades de corriente muy altas o en su defecto con densidades de corriente muy bajas que permiten la disolución de las microirregularidades en exceso o por el contrario no la permite.

Esto lo podemos confirmar observando las figuras 2.14, 2.15, 2.16 que son fotografías obtenidas a través del microscopio metalográfico, en las que se evidencia las irregularidades no eliminadas cuando se trabajó con densidades bajas y presencia de puntos de corrosión cuando se utilizó densidades altas lease $50 - 60 \text{ A / dm}^2$.

Podemos también decir que la zona donde se obtuvo los mejores resultados se encuentra comprendida entre los $35 \text{ a } 45 \text{ A / dm}^2$ que es donde se consiguieron probetas con un buen acabado, brillosas y tersas.

Al evaluar el gráfico de la figura 2.6 obtenido a partir de la tabla VI podemos determinar que la menor rugosidad la alcanzamos cuando trabajamos a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ y mantenemos los parámetros de densidad de electrolito en 1.6 gr / cm^3 , densidad de corriente a 40 A / dm^2 y tiempo de 180 seg constantes. **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 pero si observamos la figura 2.17 en la que se fotografio con el microscopio metalográfico la superficie tratada con 60 °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.

En la figura 2.7 si analizamos el comportamiento de la curva rugosidad con respecto a la densidad del electrolito vemos que a medida que se disminuye la densidad del electrolito recomendada por los investigadores de $1.6 \text{ gr} / \text{cm}^3$ la rugosidad se va incrementando en valores relativamente pequeños hasta llegar a sobrepasarlos límites de aceptación, por lo tanto la densidad es un parametro que no influye sobremanera en la rugosidad de la superficie. Sin embargo en la inspección visual las probetas electropulidas con densidades de electrolito menores a $1.55 \text{ gr} / \text{cm}^3$ presentan superficies opacas, sin brillo es decir una superficie mate esto es consecuencia de la reducción del contenido de acido cromico que es el responsable de dar brillo y lustre a las piezas tratadas.

Así mismo si analizamos la figura 2.8 podemos evaluar el comportamiento de la rugosidad de la superficie luego del tratamiento de electropulido cuando las probetas fueron lijadas antes del proceso con diferentes grados de lija, así tenemos que mientras mas alta es la numeración menor es el tamaño del grano de la lija por lo tanto, cuando tenemos una rugosidad inicial de 17.6 micras despues del tratamiento de electropulido la variación de rugosidad es minima manteniendose las rayaduras provocadas por la lija presentes aun despues del tratamiento. Para mayor detalle de lo aseverado las figuras 2.18, 2.19 y 2.20 muestran las huellas dejadas por el pulido con lijas en el inicio del proceso. Además podemos delimitar las zonas de trabajo por lo cual tenemos:

La zona comprendida entre 500 - 800 (10.5 - 8.5 micras) es una zona en la que se obtienen mejores resultados en lo que se refiere a minima rugosidad de superficie post tratamiento, no obstante si evaluamos brillo lo obtenemos puliendo indistintamente con cualquier grado de lija.

La evaluación de la figura 2.9 fue hecha en base a la inspección visual y análisis a traves del microscopio metalografico. Partimos de una rugosidad inicial producto de las huellas dejadas por el abrasivo de la lija, así pues si pulimos con un grado de lija 220 las huellas dejadas sobre la superficie tendran una rugosidad de 17.6 micras mientras que una superficie lijada con un grado de 1000 tendran una rugosidad de 7.8

micras. Por lo tanto , cuando electropulimos las piezas a diferentes densidades de corriente el tiempo necesario para eliminarlas parcial o totalmente se dio de la siguiente manera.

Para **40 A / dm²** el comportamiento de la curva fue que para obtener superficies brillosas y de buen acabado superficial el tiempo de exposicion oscilo entre 30 y 60 **seg.** , por encima de este tiempo las rugosidades iniciales no desaparecieron totalrnente dejando huellas observables a simple vista.

Ahora **bien** si analizamos la curva de la figura 2.10 que fue trabajada con una densidad de corriente de **20 A / dm²** vemos que mantenisndo mas tiempo la permanencia de las piezas en el baño **electrolítico** no se logra obtener un acabado superficial satisfactorio asi por ejemplo, cuando iniciarnos con una rugosidad de 15.4 micras correspondiente a una lija de grado 400 **el** tiempo de electropulido fue de 270 seg y la probeta presentaba manchas y **zonas** opacas asi como tambien irregularidades no suavizadas, esto se **debe** a que a bajas densidades de corriente se requiere de tiempos **mayores** para obtener resultados aceptables.

Si pulimos con densidades de corriente de **60 A / dm²** figura 2.11 vemos que la curva se desplaza hacia abajo es decir, que se requiere **menos**

tiempo para obtener resultados satisfactorios, aquí se logró una superficie con mejor apariencia solo cuando **la** probeta fue sumergida y mantenida por espacio menor a un minuto debido a que a mayor densidad de corriente utilizada el tiempo necesario debe ser menor confirmando la teoría de los investigadores.

Para saber el tiempo necesario para lograr piezas con rugosidades de superficie en el orden de 8 - 10 micras podemos remitirnos a la figura 2.12 en donde observamos el comportamiento del tiempo en función de la densidad de corriente requerida y nos damos cuenta claramente como a medida que aumenta la densidad de corriente el tiempo de exposición va disminuyendo.

Cuando se utiliza una densidad de corriente de 40 A/dm^2 el tiempo necesario es de 180 seg para lograr rugosidades del orden de 8 - 10 micras. En cambio si utilizamos una densidad de 60 A/dm^2 el tiempo que se requiere **para** obtener la rugosidad **ya** estipulada fue de 60 seg. Cuando se utilizó una densidad de corriente de 10 A/dm^2 el tiempo aumenta hasta llegar a ser de 270 seg. para obtener condiciones de acabado superficial aceptables en lo que se refiere a rugosidad **pero** en cambio el brillo decorativo de la probeta se va perdiendo a medida que aumentamos el tiempo de permanencia en el baño.

Si se utiliza una densidad de corriente superior a 50 A / dm^2 aparecen pequeñas picaduras que son observables bajo el microscopio debido a que se incrementó la densidad de corriente y por lo tanto no se pudo obtener la rugosidad deseada.

CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES

IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente trabajo se lo ha efectuado por 2 razones principales : primero, desvelar y conocer el proceso en todos sus detalles. Segundo, para que una vez conocido el proceso se lo pueda implementar a nivel industrial dando al empresario las herramientas suficientes para su utilización.

De los resultados obtenidos en la parte experimental son interesantes los siguientes puntos:

1. La temperatura de trabajo no debe exceder de los 30 °C, 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 densidades de corriente comprendidas entre los rangos de 35 - 45 A / dm² . Electropulir con densidades 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 tambien zonas en que el pulido produce picaduras de corrosion y zonas donde el resultados son superficies mates

3. La densidad del electrolito no influye sobremanera en la rugosidad de la superficie de las piezas pero sí influye en la apariencia y acabado decorativo de las mismas ; por consiguiente con densidades menores a la estipulada de 1, 60 gr / cm³ se consiguen acabados menos brillantes .

4. El pulido inicial de la piezas tiene mucha influencia en el tratamiento de electropulido. Así tenemos que las rayaduras producidas por lijas de mayor tamaño de grano (220) no fueron suavizadas aun despues del tratamiento de electropulido normal, mientras que con una lija de menor tamaño de grano (500) utilizada en el proceso inicial menor seran las rayaduras dejadas sobre su superficie y sera menor el tiempo empleado para eliminarlas durante el electropulido .

5. Para obtener resultados favorables en el electropulido fue necesario trabajar con rangos de tiempo comprendidos entre **180 - 240** segundos debido a que **se** logra un brillo llamativo, acabado **decorativo** optimo y rugosidad final aceptable . Si **se** trabaja con valores superiores se obtiene brillo pero las irregularidades **de** la superficie no desaparecen , por lo tanto se puede decir que el alisado de una superficie no **está** relacionado con el brillo o lustre de las mismas .

•

RECOMENDACIONES

1.- Es preciso que la composición, la temperatura y sobre todo la densidad de corriente anódica del baño se controlen cuidadosamente, ya que de no hacerlo se corre el peligro de que la superficie se ataque más y **se pule**.

2.- Se debe tener mucho cuidado en la preparación de la pieza a electropulir en especial el enjuague antes del baño electrolítico para eliminar toda la grasa y polvo adherido. Para el secado final de la pieza es necesario 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 no debe ser mayor a la obtenida con la lija de numero 500 equivalente a 13,8 micras

5.- Verificar el buen contacto de las piezas debido a que es fundamental para el electropulido, un falso contacto eléctrico puede ocasionar la destrucción de la pieza .

6.- 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

7.- Una recomendación es el almacenamiento de los ácidos después de su utilización para una posterior entrega a entidades de protección al medio ambiente . En los actuales momentos Vachagnon es la Empresa que compra desperdicios químicos sin embargo no ha presentado el aval que lo acredite como Empresa encargada de eliminar residuos químicos.

ANEXOS

ANEXO A

COMPOSICION DEL ELECTROLITO Y CONDICIONES DE TRABAJO PARA ELECTROPULIR NIQUEL			
ELECTROLITO	Densidad de Corriente Anodica (A / dm)	TEMPERATURA (°C)	TIEMPO DE PULIDO (min)
Acido sulfurico 1.100 g / l	30 - 40	20 - 40	0.5 - 2
Acido sulfurico 1.200 g / l acido ortofosforico 90 g / l	30 - 40	40 - 50	2.0 - 3.0
Acido sulfurico 1.200 g / l acido cromoico 40 g / l peroxido de hidrogeno (30 %) 75 g / l	30 - 35	20 - 25	0.5 - 1
Acido sulfurico 900 g / l acido ortofosforico 750 g / l acido citrico 20 g / l	35 - 50	20 - 25	0.2 - 1
Acido sulfurico 1.100 g / l acido cromoico 40 g / l glicerina 40 g / l	30 - 40	25 - 35	0.3- 0.75

ANEXO B

SOLUCIONES Y CONDICIONES DE TRABAJO PARA EL ELECTROPULIDO DEL ALUMINIO				
SOLUCION (% en peso)	Densidad de corriente Anódica (A / dm)	VOLTAJE (V)	TEMPERATURA (°C)	TIEMPO DE TRATAMIENTO (min)
Acido ortofosfórico 65 ácido sulfúrico 15 ácido crómico 6 agua 14	20 - 25	12.0 - 15.0	70 - 80	2.0 - 5.0
Acido ortofosfórico 43 ácido sulfúrico 43 ácido crómico 3 agua 11	30 - 50	12.0 - 15.0	70 - 80	2.0 - 5.0
Acido ortofosfórico 36 ácido sulfúrico 36 ácido crómico 4 agua 24	20 - 40	12.0 - 15.0	70 - 90	1.0 - 5.0
Ácido ortofosfórico 82 ácido crómico 12 agua 6	20 - 40	12.0 - 15.0	70 - 80	1.0 - 3.0
Fosfato trisódico 5 sosa (calcinada) 15	3.5 - 6.5	12.0 - 15.0	80 - 90	5.0 - 8.0

ANEXO C

COMPOSICION DE LOS BAÑOS Y CONDICIONES DE TRABAJO PARA EL ELECTROPULIDO DE ZINC, CADMIO, ESTANO, PLOMO , COBALTO, TUNGSTENO, ORO, TITANIO Y CROMO					
METAL	ELECTROLITO	Densidad de Corriente Anodica (A / dm ²)	TEMPERATURA (°C)	TIEMPO DE TRATAMIENTO (min)	
Zinc y estaño	Hidroxido potasico 25 %	16	ambiente	10.0 - 15.0	
Zinc	Acido cromico 17 % agua 83 %	1.8			
Zinc	Acido cromico 7% Dicromato potasico 29% acido suifurico 6% agua 58 %	0.2			
Zinc	Acido suifurico 150 g / l acido cromico 4 g / l	40	menos 25°C	1.0 - 2.0	
Zinc y Cadmio	Cianuro potasico 5%	16	ambiente		
Plomo	Acido perclorico 18.5 - 33% acido acetico 63 - 76.5% agua 2 - 9%	0.03 - 0.06	20 - 39	5.0 - 10	

ANEXO C

(continuación)

METAL	ELECTROLITO	Densidad de corriente Anodica (A / dm)	TEMPERATURA (°C)	TIEMPO DE TRATAMIENTO(min)
Plomo	Acido perclórico 30 - 34 % acido acetico glacial 66 - 70 %	0.1 - 0.2	20 - 39	5
Plomo Tungsteno Cobalto *	Hidroxido sodico 10%	3.0- 6.0	ambiente	8.0- 10
Tungsteno	Acido ortofosforico (peso especifico 1.35)	0.07	38 - 49	10
Oro **	Ortofosfato monosodico 160gr agua 1 L	0.07	38 - 49	10
Oro **	Cianuro potasico 40 g / Ferricianuro potasico 10 g / l sosa (calcinada) 20 g / l hidroxido sodico 5 g / l	0.07	38 - 49	10
Oro	Tiourea 25 g / l acido sulfúrico 5.5 g / l ácido tartárico 10 g / l	1.5 - 3.5	20 - 45	5

Las condiciones del electropulido se controlan suministrando una tension constante de 1,2 voltios

** Las condiciones del electropulido se controlan suministrando una tension de 15- 20 voltios

(continuación)

METAL	ELECTROLITO	Densidad de Corriente Anodica (A / dm)	TEMPERATURA	TIEMPO DE TRATAMIENTO (min)
titanio	Anhidrido acético 795 ml acido perclorico (densidad 1.59) 185ml agua 48 ml	20 - 30		0.5 - 1
zromo	Acido sulfurico 60 % acido ortofosforico 20 % acido cítrico 10 % agua 10 %	20 - 30	ambiente	5.0 - 10

ANEXO D

COMPOSICION DEL ELECTROLITO Y CONDICIONES DE TRABAJO PARA EL ELECTROLITO DEL ACERO				
COMPOSICION DEL ELECTROLITO (%)	Corriente A_{édica}	TEMPERATURA (°C)	TIEMPO DE TRATAMIENTO (min)	MATERIAL
Acido perclórico 20 alcohol etílico 80	13 - 40	20 - 25	0.1 - 0.2	Acero inoxidable acero al carbono
acido sulfúrico 50 glicerina 40 agua 10	100	82	a	acero inoxidable aceros
Acido ortofosforico 42 glicerina 4T agua 11	20 - 80	90 - 140	8.0 - 15	aceros
Acido cítrico 50 - 70 ácido sulfúrico 15 - 20 agua 25 - 30	10.0 - 20	45 - 125	5.0 - 10	aceros
Sulfúrico 15 - 20 ortofosforico 63 - 70 agua 13 - 22	5.0 - 50	43 - 54	5.0 - 10	aceros
Acido perclorico 20 - 30 anhidrido acético 80 - 70	15 - 30	20 - 25	5.0 - 15	acero inoxidable aceros al carbono

(Continuación)

COMPOSICION DEL ELECTROLITO (%)	Corriente Anodica (A / dm)	TEMPERATURA (° C)	TIEMPO DE TRATAMIENTO (min)	MATERIAL
Acido sulfurico 15 - 40	20 - 100	50 - 70	2.0 - 8	acero inoxidable aceros al carbono
acido ortofosforico 50 - 10				
glicerina 12 - 45				
agua 23 - 5				
Acido ortofosforico 70 - 80	15 - 45	35 - 100	5.0 - 10	acero inoxidable acero al carbono
agua 20 - 30				
Acido ortofosforico 40 - 45	40 - 70	70 - 80	5.0 - 15	acero al carbono acero inoxidable
acido sulfurico 45 - 35				
acido cromico 3				
agua 17				
Acido ortofosfórico 46	10.0 - 50	27 - 38	3.0 - 5	aceros al carbono
acido sulfúrico 40				
glucosa 4				
agua 10				
Acido ortofosfórico 86 - 88	5.0 - 10	50	30	aceros al carbono
acido cromico 10 - 12				
agua 0 - 2				
Acido ortofosforico 70	40 - 50	85 - 90	5.0 - 10	aceros al carbono
acido cromico 20				
agua 10				

(continuación)

COMPOSICION DEL ELECTROLITO (%)	Corriente anodica (A l d m)	TEMPERATURA (°C)	TIEMPO DE TRATAMIENTO (min)	MATERIAL.
Acido ortofosforico 55 - 78 acido sulfurico 12 - 20 acido cromico 5 - 7 agua 3 - 20	30 - 100	40 - 80	5.0 - 20	acero al carbono aceros de bajas aleaciones
Acido ortofosforico 45 - 60 ácido sulfurico 40 - 20 agua 12 - 20	50 - 100	40 - 80	5.0 - 10	aceros al carbono
Acido perclórico 5 ácido acético glacial 95	10.0 - 30	20	5.0 - 15	aceros al carbono y aleados

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. SHPITAL'SKIY, E. Y. ,Russian Patent N° 23896, Jan 19th, 1911.
2. JACQUET, P., Le Génie Civil, 1936, N° 4.
3. ELMORE, W. C. , Journal of Applied Physic, 1939 - 1940
4. BATASHEV, K P. and NIKITIN, E. N. , Zhur. Prikland. Khim, 1950.
5. LAYNER, V. Y., Electrolytic Polishing and Etching of Metals, Mashgiz, 1947.
6. FORTUNATOV, A. V., and FINKEL'SHTEYN, A. V., Dok. Akad. Nauk SSSR, 1953.
7. LEVIN, A. Y., Stanki y Instrument, 1944
8. FEDOTIEV - GRILIJES, Electropulido y Anodizado de Metales, Gili, Barcelona, 1972
9. FREDERICK A. LOWENHEIM, Electroplating , Mc Graw Hill, 1982.
10. R. M. BURNS - W.W. BRADLEY, Recubrimientos Protectores de los metales, interciencias, Madrid, 5 1965
11. METAL HAND BOOK, Surface Cleaning, Finishing and Coating, American Society for Metal, Volumen 5, 9ena Edición, 1982.
12. CHARLES L. FAUST, Manual de Ingeniería de los Recubrimientos Electroliticos, Continental S.A., Argentina , 1974.
13. RAYMOND F. KIRK - DONALD OTHMER, Enciclopedia de Tecnologia Quimica, UTEHA, Volumen 6 - 10 , 1962.

14. **THOMAS ROBINSON, Product Finishing , Revista, Marzo 95, Volumen 59, N° 6.**
15. **INTERNATIONAL- STANDAR ORGANIZATION, 4287-1, Surface Roughness Terminology , 1984.**
16. **ODETE NOBRE, Perfil de uma Superficie Rugosidade, Curso Especializado em novas tecnologias de tratamento de superficies e revestimentos.**