



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

“Manual de Procesos de Desengrasado y Pulido Electrolítico para Procesos de Galvanoplastia”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA

PRESENTA:

Janet Rosas Pacheco

ASESOR: Q. Celestino Silva Escalona

Cuautitlán Izcalli, Edo. De México, 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTO APROBATORIO

M. en C. JORGE ALFREDO CUELLAR ORDAZ
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN
PRESENTE

ATN: M. EN A. ISMAEL HERNÁNDEZ MAURICIO
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos a comunicar a usted que revisamos el: Trabajo de Tesis

Manual de procesos de desengrasado y pulido electrolítico para procesos de galvanoplastia

Que presenta la pasante: Janet Rosas Pacheco

Con número de cuenta: 404091510 para obtener el Título de: Ingeniera Química

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 08 de Octubre de 2014.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	Dr. Eligio Pastor Rivero Martínez	
VOCAL	Q. Celestino Silva Escalona	
SECRETARIO	I.Q. Elvia Mayen Santos	
1er. SUPLENTE	I.Q. Paula Álvarez Fernández	
2do. SUPLENTE	I.Q. Miguel Ángel Vázquez Flores	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

HMI/iac



A mis padres

A mis hermanas

A mi esposo

A mi hija

Agradecimientos

A DIOS por dejarme culminar este gran logro en mi vida.

A la Familia Sánchez Ortiz por su gran apoyo en los momentos más difíciles, en verdad GRACIAS!!!!!!

A mis entrañables compañeros, amigos y confidentes Jezabel, Miguel y Félix, gracias por todos estos años de amistad, por haberme alentado a seguir día a día.

A mi gran familia: tíos, cuñados, primos por todo el apoyo brindado y por alentarme a terminar con este trabajo tan importante para mí.

“No hay que confundir nunca el conocimiento con la sabiduría. El primero nos sirve para ganarnos la vida; la sabiduría nos ayuda a vivir”.

Carey, S.

“Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como una oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber”.

Albert Einstein



Resumen	III
Abreviaturas/ Nomenclaturas	IV
Índice de Figuras	V
Índice de Tablas	VI
Introducción	1
Objetivos	2
Objetivos Específicos	2
Capítulo I	
<i>Pulido electrolítico</i>	3
1.1 Conceptos generales	3
1.2 Condiciones de la superficie del metal durante el electropulido	5
1.3 Relaciones entre el potencial anódico del metal, la temperatura y la composición del electrolito	6
Capítulo II	
<i>Efectos del pulido electrolítico en las propiedades del metal</i>	8
2.1 Propiedades mecánicas	8
2.2 Abrasión	9
2.3 Propiedades Eléctricas y Magnéticas	9
2.4 Resistencia a la Corrosión	9
2.5 Acabado o Apariencia	10
Capítulo III	
<i>Etapas del proceso del pulido electrolítico</i>	12
3.1 Secuencia de operaciones	¡Error! Marcador no definido.
3.2 Tratamientos mecánicos y químicos previos	13
3.3 Pulido electrolítico	14
3.4 Tratamientos posteriores al pulido electrolítico	15
3.5 Equipo y material para el pulido electrolítico	15
3.6 Aspectos técnicos y económicos	21
Capítulo IV	
<i>Aplicaciones del pulido electrolítico</i>	22
4.1 Acabado decorativo	23

4.2 Pulido electrolítico de piezas sometidas a fricción	24
4.3 Pulido electrolítico de herramientas de corte	25
4.4 Pulido de instrumentos de medida	25
4.5 Mejora del alisado de superficies	26
4.6 Pulido electrolítico de laminados	27
Capítulo V	
<i>Pulido electrolítico de algunos metales</i>	28
5.1 Pulido electrolítico del acero	28
5.2 Pulido electrolítico de cobre y sus aleaciones	32
5.3 Pulido electrolítico de níquel	35
5.4 Pulido electrolítico de aluminio	37
5.5 Pulido electrolítico de plata	39
5.6 Pulido electrolítico del zinc, estaño, plomo, cobalto, oro, titanio y cromo	40
Capítulo VI	
<i>Desengrase electrolítico</i>	43
6.1 Conceptos generales	43
6.2 Desengrase electrolítico anódico	45
6.3 Desengrase electrolítico catódico	46
6.4 Baños utilizados en el desengrase electrolítico	47
Capítulo VII	
<i>Etapas del proceso de desengrase electrolítico</i>	48
7.1 Tratamientos previos al desengrase electrolítico	48
7.2 Tratamientos posteriores al desengrase electrolítico	50
7.3 Equipo para el desengrase electrolítico	53
7.4 Aplicaciones del desengrase electrolítico	54
Conclusiones	55
Anexo	56
Bibliografía	58

*R*esumen

En presente trabajo se tiene como objetivo la elaboración de un manual técnico que describa el procedimiento y consideraciones de los procesos de galvanoplastia, para procesos de pre-tratamientos (desengrasado y electropulido).

En el Capítulo I se abordarán los conceptos generales, las condiciones de la superficie del metal y la relación que existe entre el potencial anódico, la temperatura y la composición del electrolito en el pulido electrolítico.

En el Capítulo II se hablará de los efectos del pulido electrolítico en las propiedades del metal como son: las propiedades mecánicas, abrasión, propiedades magnéticas y eléctricas, la resistencia a la corrosión y por último el acabado o apariencia que debe tener el metal después del electropulido.

En el Capítulo III se describirán las etapas del proceso del pulido electrolítico como son: las secuencias de operaciones, los tratamientos previos y posteriores al electropulido, así como el equipo que se utiliza para el pulido electrolítico.

En el Capítulo IV se abordara las aplicaciones del pulido electrolítico como son: el acabado decorativo, en piezas sometidas a fricción, en herramientas de corte, electropulido en instrumentos de medida así como en laminados.

En el Capítulo V se describirá el pulido electrolítico de algunos metales, así como los electrolitos que se utilizan para cada uno de ellos, por mencionar algunos: el acero, el cobre y sus aleaciones, el níquel, el aluminio, la plata, el zinc, estaño, plomo, cobalto, oro, titanio y cromo.

En el Capítulo VI se retomaran conceptos generales del desengrase electrolítico, y se explicara el desengrase electrolítico anódico y catódico y los baños utilizados en el proceso del desengrase.

Y por último en el Capítulo VII se describirán las etapas del proceso de desengrase electrolítico como son: los tratamientos previos y posteriores al desengrase electrolítico, el equipo que se utiliza para el desengrase y aplicaciones del desengrase electrolítico.

Abreviaturas/ Nomenclatura

M^{n+}	Ion metálico o catión
A	Amperios
V	Voltios
$^{\circ}C$	Grados centígrados
g	Gramo
kg	Kilogramo
mm^2	Milímetro cuadrado
mL	Mililitros
mg	Miligramo
g/L	Gramo sobre litro
A/dm^2	Amperes sobre decímetro cuadrado
C.C	Corriente continua
A/l	Amperes sobre litro
A/gal	Amperes sobre galón
A/dm^2	Densidad de corriente
kg/L	Kilogramo sobre litro
lb/gal	Libra sobre galón
EDTA	Ácido etilendiaminotetraacético
Cr_2O_3	Óxido de cobre II
H_3PO_4	Ácido fosfórico
NO_3^-	Nitrato
NaOH	Hidróxido de sodio
NaCN	Cianuro de sodio
Na_2CO_3	Carbonato de sodio
CuCN	Cianuro de cobre
Na_3PO_4	Fosfato de sodio
H_2O	Agua
Na_2SiO_3	Silicato sódico
Na_2SO_4	Sulfato de sodio
AISI	American Iron and Steel Institute

Índice de Figuras

Figura 1 Celda electrolítica típica para electropulido	3
Figura 2 Esquema del electropulido.....	5
Figura 3 . Relación entre los potenciales de electrodo, la caída de tensión en el electrolito y la densidad de corriente en el electropulido	5
Figura 4 Variación del potencial de ánodo del metal en relación con la densidad de corriente y temperatura del electrolito.....	7
Figura 5 Clasificación de las imperfecciones superficiales	10
Figura 6 Superficie metálica a) antes y b) después del electropulido	11
Figura 7 Procedimiento general para pulido electrolítico	13
Figura 8 Desengrase de piezas para electropulido a) Lavado con disolventes orgánicos y b) Tratamiento electrolítico de desengrase con baño	14
Figura 9 Pulidor electrolítico para piezas pequeñas.....	15
Figura 10. Tanque para electropulido	17
Figura 11 Tanque de PVC.....	18
Figura 12 Bordeado doblado para la construcción de tanques pequeños.....	19
Figura 13 Soporte para sujetar las piezas (probetas).....	20
Figura 14 Esquema general de una celda electrolítica para pulido	20
Figura 15 Aplicación típica del electropulido	23
Figura 16 Tanque de baños de Níquel.....	37
Figura 17 Tanque de baño de Cromo	42
Figura 18 Instalación para un proceso de desengrase en línea recta	44
Figura 19 Operación de decapado.....	52
Figura 20 Recipiente para desengrase electrolítico.....	53

Índice de Tablas

Tabla 1 . Efecto del pulido electrolítico sobre la microdureza de algunos metales	8
Tabla 2. Clases de Rugosidad	11
Tabla 3. Composición del electrolito y condiciones de trabajo para el pulido electrolítico del acero	28
Tabla 4. Efecto de la densidad de corriente sobre el alisado y el rendimiento de la corriente	30
Tabla 5. Causas, defectos y corrección del pulido electrolítico del acero	31
Tabla 6. Composición del electrolito y condiciones de trabajo para el electropulido del cobre y sus aleaciones	33
Tabla 7. Influencia del contenido de cobre y tiempo de electropulido	33
Tabla 8. Defectos en el electropulido del cobre con soluciones de H_3PO_4 y CrO_3	34
Tabla 9. Composición del electrolito y condiciones de trabajo para electropulir níquel	35
Tabla 10. Defectos durante el electropulido de recubrimientos con níquel	36
Tabla 11. Defectos en el electropulido del níquel con soluciones conteniendo ácido sulfúrico, glicerina e iones de cromo.....	37
Tabla 12. Composición del electrolito y condiciones de trabajo para el electropulido del aluminio	38
Tabla 13. Defectos en el electropulido del aluminio con soluciones de ácidos fosfórico, sulfúrico y crómico	39
Tabla 14. Composición del electrolito y sus condiciones de trabajo para el electropulido del zinc, estaño, plomo, cobalto, oro, titanio y cromo	41
Tabla 15. Formulas clásicas de desengrase electrolítico	47
Tabla 16. Métodos de predesengrase	48
Tabla 17. Baños de predesengrase para los diferentes metales y aleaciones	49
Tabla 18. Fórmulas de tipo de baños de decapado de metales y aleaciones corrientes	52



Introducción

La galvanoplastia fue anticipada por un discípulo de Volta, Brugnatelli, en 1807, que fue el primero en obtener depósitos de oro o plata mediante la pila. Pero su creación real corresponde a los trabajos del físico ruso H. Jacobi hacia 1837 y otras numerosas aplicaciones, especialmente en el campo del grabado, la tipografía y la imprenta. ¹

En la galvanoplastia se aplican procesos electroquímicos, es decir, se basa en procesos de deposición electrolítica de metales, la cual puede obtenerse a partir de baños electrolíticos de diferente composición, de manera que los iones metálicos presentes en soluciones ácidas, alcalinas o neutras, se reducen en las piezas a recubrir. Esto permitirá generar una capa protectora contra la corrosión, aumentar la resistencia mecánica y también con fines decorativos para partes metálicas y plásticas. Con metales como: cromo, cobre, níquel, zinc, plata y oro, se pueden proteger las superficies de partes que son utilizadas en la industria automotriz, de electrodomésticos, hospitalaria, joyería, plomería, máquinas de oficina, electrónicas entre otras. ²

Para obtener una buena capa galvánica, el objeto deberá pasar por varios pasos previos y posteriores al tratamiento. Los *pre-tratamientos* consisten en desengrasado y electropulido, y el *post-tratamiento* consiste en el sellado. En el pre-tratamiento de desengrasado consiste en la eliminación de las grasas y aceites de la superficie de las piezas metálicas, para ello se utilizan tres tipos de desengrase considerando el tipo de grasa adherida en el material, éstos son: limpieza con álcalis por inmersión o rociado, desengrase con solventes orgánicos y desengrasado electrolítico con álcalis.

El electropulido es considerado la inversa de la galvanoplastia, es un proceso electroquímico que mediante la disolución anódica en una solución electrolítica con una corriente eléctrica impuesta. Debido a la aplicación de cargas eléctricas los átomos de metal son removidos rápidamente dando como resultado un efecto de nivelado de la superficie del metal que proporciona una superficie con una mayor integridad (eliminando rebabas, bordes filosos y otras imperfecciones presentes) y brillante que los acabados mecánicos convencionales. ^{3,4}

En este trabajo se plantea la revisión bibliográfica y la descripción de estas dos etapas de pre-tratamiento para la electrodeposición, tomando en cuenta los fundamentos que se involucran en estas, conociendo además los factores, variables, equipos utilizados que intervienen para un buen proceso de tratamiento de superficies, logrando un producto de buena calidad tanto para las plantas, talleres y a las industrias que se dedican a la galvanotecnia.

Objetivos

Elaborar un manual técnico que describa los procedimientos y consideraciones de desengrase y pulido electrolítico de los procesos de galvanoplastia para procesos de pre-tratamientos.

Objetivos Específicos

- Llevar a cabo la recopilación de información acerca de las etapas de pre-tratamiento para realizar la electrodeposición de metales en galvanoplastia, en este caso desengrase y pulido electrolítico.
- Elaborar un manual para el apoyo de técnicos e ingenieros y todos aquellos que tengan algún interés y relación en los procesos de electrodeposición para galvanoplastia.
- Describir la metodología, equipos y variables para las dos etapas de pre-tratamiento (desengrase y pulido electrolítico).

CAPÍTULO I

Pulido electrolítico

Para el entendimiento del pulido electrolítico es necesario repasar los conceptos generales, debido a la necesidad de ampliar el panorama y el alcance de la técnica superficial. La descripción de la fenomenología que ocurre sobre la superficie metálica antes, durante y después que se aplica el proceso de pulido electrolítico, y las variables que están involucradas así como su relación entre ellas.

1.1 Conceptos generales

En este apartado se dará los conceptos generales de la terminología técnica del proceso de pulido electrolítico.

- *Pulido electrolítico*

El pulido electrolítico es una técnica de acabado químico para superficies, mediante el cual el metal se disuelve electrolíticamente, ion por ion, de la superficie de un objeto metálico. El objetivo primario es minimizar la microrrugosidad, reduciendo de manera espectacular el riesgo de adhesión de suciedad o residuos, mejorando la limpieza de las superficies, y se usa para eliminar rebabas, abrillantar y pasivar.

El pulido electrolítico, según Jacquet, consiste en introducir la probeta en un electrolito adecuado y usarla como ánodo, haciendo circular por el sistema una intensidad de corriente eléctrica continua, elegida convenientemente, la cual es característica para el metal y electrolito utilizado. Cuando se hace que las probetas bajo condiciones adecuadas, se disuelvan como ánodos, su superficie se vuelve tersa y brillante. A este procedimiento se le conoce con el nombre de “Electropulido” o “Limpieza electrolítica”. La siguiente Figura 1, muestra una celda típica para electropulido.

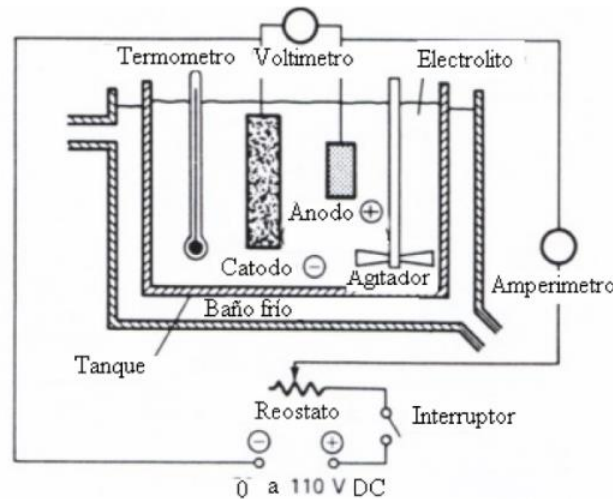


Figura 1. Celda electrolítica típica para electropulido ⁵

- *Ánodo*

Electrodo en el que se produce la oxidación de alguna sustancia. En los ánodos fluye corriente eléctrica positiva hacia el medio electrolítico (transferencia de cationes a la solución, o de aniones de la solución al electrodo). En los fenómenos, que suelen desarrollarse en la superficie del electrodo,

las zonas de mayor tendencia a disolverse, en las que los átomos metálicos se oxidan a cationes: $M \rightarrow M^{n+} + ne^-$.

- *Catión*

Ion cargado positivamente, que migra al cátodo en una celda electrolítica, o se produce en el ánodo de una celda electroquímica.

- *Capa*

Película o film superficial, a veces de espesor tan pequeño que no resultan visibles.

- *Celda electrolítica*

Celda en la que se utiliza la energía eléctrica para provocar reacciones en el electrodo, convirtiéndose en energía química.

- *Celda electroquímica*

Celda en la que la energía química se transforma en energía eléctrica.

- *Corriente eléctrica*

Flujo de cargas eléctricas: de electrones en los conductores metálicos y de iones en los conductores electrolíticos. Se acepta, a pesar de la aparente falta de lógica, que la corriente eléctrica fluye en dirección opuesta al flujo de electrones.

- *Densidad de corriente*

Cantidad de corriente por unidad de tiempo y superficie. Suele expresarse en A/m^2 , mA/m^2 , mA/cm^2 , $\mu A/cm^2$, etc.

- *Electrodo*

Conductor electrónico, normalmente metálico, por medio del cual se proporcionan los electrones necesarios a una reacción, se consumen los electrones resultantes de la misma.

- *Electrolito*

Sustancia química o mezcla de ellas usualmente líquida o en solución acuosa, que contiene iones que migran en un campo eléctrico. Más simple: conductor iónico.

- *Galvanoplastia*

Es la aplicación de un recubrimiento metálico por medio de un proceso electrolítico. Esto es poniendo una carga negativa en un objeto y al exponerlo a una solución que contiene una sal metálica. Los iones metálicos cargados positivamente en la solución de sal se sienten atraídos por el objeto, formando una capa metálica sobre él. Por ejemplo: plata, níquel, cobre y zinc son los metales generalmente más utilizados en este proceso.

- *Metal*

Son los elementos químicos capaces de conducir la electricidad y el calor, que exhiben un brillo característico y que, con la excepción del mercurio, resultan sólidos a temperatura normal.

- *Potencial*

Es el trabajo que debe realizar una fuerza externa para traer una carga positiva unitaria, desde el punto de referencia hasta el punto considerado en contra de la fuerza eléctrica a velocidad constante.

1.2 Condiciones de la superficie del metal durante el electropulido

El pulido electrolítico funciona básicamente debido que, al disolverse el metal bajo circulación de corriente, se forma una capa viscosa de productos de la disolución, la cual se va difundiendo lentamente en el baño electrolítico.

El espesor de esta capa no es constante, siendo mayor en los valles; y como su resistencia eléctrica es superior a la de la solución de electropulido, conduce a una disolución preferencial de los picos, y a una nivelación de la superficie.

En la (Figura 2a) se puede apreciar el esquema de un corte transversal (a escala microscópica) de la superficie al comienzo del procedimiento, y en la (Figura 2b) como después de un tiempo de tratamiento la superficie se ha disuelto y comienza a “nivelarse”.⁶

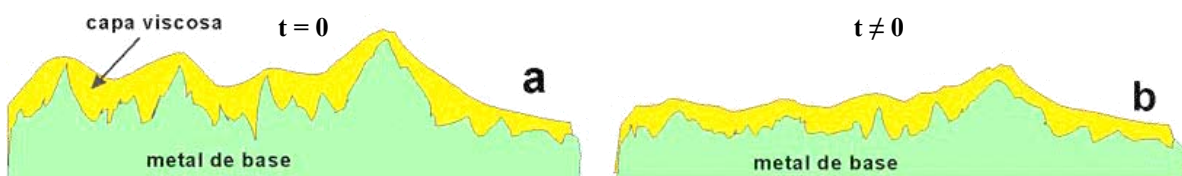


Figura 2. Esquema del electropulido ⁷

Para ir describiendo la superficie del metal durante el electropulido se observan las curvas de densidad de corriente-potencial, en la Figura 3 se muestra la relación existente entre los potenciales de electrodo, la caída de tensión en el electrolito y la densidad de corriente obtenida con una solución. Los potenciales están referenciados al potencial del electrodo de referencia de hidrógeno.

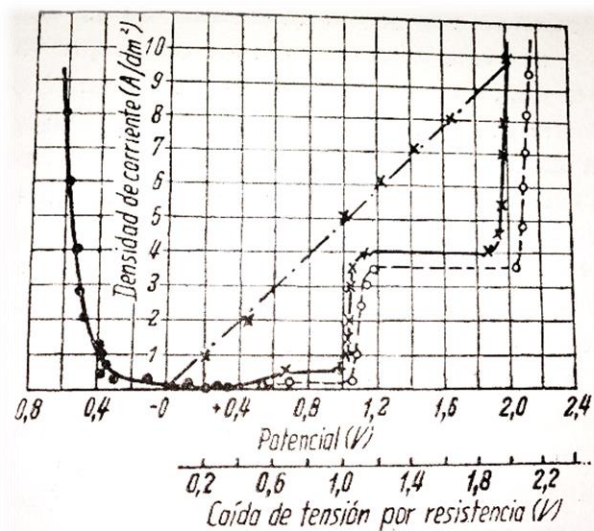


Figura 3. Relación entre los potenciales de electrodo, la caída de tensión en el electrolito y la densidad de corriente en el electropulido ⁸

La caída de tensión en el electrolito es proporcional a la densidad de corriente. La curva de potencial de cátodo caracteriza el desprendimiento de hidrógeno y la reducción del ion en solución. La curva del ánodo tiene dos tramos horizontales en los que un aumento de potencial anódico no hace variar la densidad de corriente. Al potencial correspondiente al final del segundo tramo horizontal, comienza

el desprendimiento de burbujas de hidrogeno. Son los cambios de potencial en el ánodo los que determinan la peculiar forma de la curva corriente- potencial.

Para el proceso del ánodo, la aparición de sus tramos se hace posible cuando la velocidad de suministro de aniones queda retardada. Cuando la capa anódica está sobresaturada de iones provenientes de la disolución del metal se origina una precipitación de sales sobre el ánodo. Si el depósito formado es continuo, puede llegar a interrumpirse por completo el paso de corriente. Si el depósito de sales es poroso, la intensidad de la corriente queda limitada por el aumento de la resistencia a medida que va adquiriendo más grosor el depósito.

El caso de la disolución anódica del metal por una solución concentrada y viscosa, la supersaturación salina de la capa anódica influye mucho en la formación de una película de sales sobre la superficie del metal con bajas densidades de corriente. La formación de la película limita el acceso del ácido sobre la superficie del metal y origina la aparición del primer tramo horizontal de la curva de potencial anódico. Aparece, pues, la posibilidad de formarse una película de óxido en la superficie del metal al incrementarse el potencial anódico, sea como resultado de una hidrólisis de sales o bien por oxidación directa del metal. El mismo proceso provoca la aparición del segundo segmento horizontal. En estas circunstancias, aparte la aparición de un nuevo proceso anódico o cambio de estructura de la película del óxido, la densidad de corriente en un amplio margen de potencial, quedara determinada por la velocidad de disolución de la película en el ácido y no dependerá del valor del potencial del electrodo.⁸

1.3 Relaciones entre el potencial anódico del metal, la temperatura y la composición del electrolito

La resistencia de un electrolito disminuye con un aumento en la temperatura, y así el voltaje (Volts) requerido para obtener la misma densidad de corriente (A/área). El voltaje para mantener una densidad de corriente, está dado por la ecuación empírica ⁹:

$$V = K / (a\theta + b) \quad (1)$$

Donde θ es la temperatura, a y b son constantes determinadas por la conductividad del electrolito, las dimensiones de la celda y K la corriente que pasa a través de la celda. De esta ecuación está claro que el voltaje requerido para mantener una densidad de corriente dada disminuye con un incremento de la temperatura.

Sin embargo a temperaturas altas, la viscosidad del baño disminuye lo que hace más difícil mantener la capa viscosa en el ánodo. Así la temperatura óptima de operación debe ser seleccionada para minimizar la energía requerida sin dañar el acabado.

En algunos casos hay un aumento considerable en la temperatura de la solución durante el pulido, esto se debe en parte a la resistencia de la solución y en parte a la presencia de capas en el ánodo con altas resistencias.

Para comprender mejor el proceso del electropulido, interesa estudiar los potenciales de ánodo del metal que se pule, su magnitud y cambios originados por la naturaleza de los fenómenos que se producen sobre la superficie anódica. La Figura 4 muestra la relación entre el potencial anódico, la densidad de corrientes y la temperatura del electrolito. A temperatura de 20 °C puede observarse que la densidad de corriente es mínima hasta llegar a los +1.8 V, lo que indica una alta resistencia de contacto metal-solución.

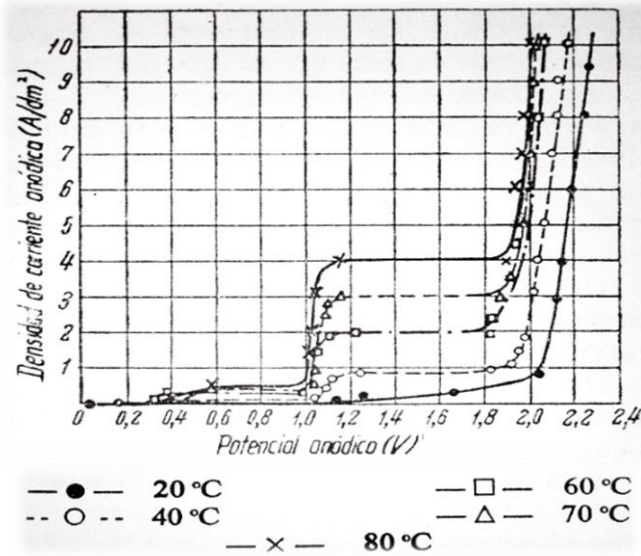


Figura 4. Variación del potencial de ánodo del metal en relación con la densidad de corriente y temperatura del electrolito ⁸

A los +1.8 V, coincidiendo con el inicio del desprendimiento de oxígeno, la corriente se eleva súbitamente. El aumento de la temperatura del electrolito afecta mucho la forma de la curva. A 40°C se aprecian dos tramos horizontales (densidad de corriente constante). Al aumentar más la temperatura se mantiene una forma de curva con dos tramos horizontales. La transición del primer tramo horizontal al segundo se produce a un potencial de +1.0 V, desplazándose ligeramente dicha transición hacia potenciales menos positivos a medida que aumenta la temperatura.

La temperatura del electrolito influye sobre la solubilidad de las sales; la película de sales es más porosa al aumentar la temperatura y permite el incremento de la densidad de corriente ⁸.

CAPÍTULO II

Efectos del pulido electrolítico en las propiedades del metal

El electropulido tiene efectos sobre las propiedades del metal relacionadas con su superficie. Al mecanizar los metales por medio de herramientas cortantes, abrasivos y pulidos quedan expuestos a los efectos mecánicos y térmicos. Se producen deformaciones y roturas de la red cristalina superficial convirtiendo los cristales en fragmentos de tamaño pequeño, tanto más cerca estén de la superficie.

El efecto del pulido electrolítico sobre las propiedades de un metal o una aleación dependen de la naturaleza del material electropulido, su composición química, su estructura y del tratamiento mecánico previo sufrido¹⁰.

2.1 Propiedades mecánicas

El pulido electrolítico no tiene efectos significativos sobre las tensiones internas y relativas deformaciones de las superficies. Pero si tienen efectos sobre la dureza de la superficie del metal. El cambio de dureza puede medirse cuantitativamente mediante una técnica de medida especial. Los métodos usuales de medida de la dureza por deformaciones producidas mediante cargas relativamente altas no permiten una medición precisa del cambio de dureza debida al electropulido, puesto que implican la deformación de un volumen relativamente grande y no dan una medida significativa de la dureza de la superficie.

Los cambios de dureza originados por el pulido electrolítico (Tabla 1) solo pueden detectarse con medidas de microdurezas en las que se utilizan cargas muy pequeñas.

Tabla 1 . Efecto del pulido electrolítico sobre la microdureza de algunos metales ⁸

Metal	Después del pulido mecánico	Después del electropulido
Aluminio	40.7	36.2
Cobre	97.3	61.4
Acero inoxidable	270.1	210.7

Como se puede observar en la Tabla 1, el pulido electrolítico reduce la microdureza. El incremento de la microdureza en el pulido mecánico de una probeta es debido a la presencia de la capa exterior endurecida. Al eliminar dicha capa superficial con el electropulido se provoca una disminución de la microdureza. Los valores estables de microdureza que se obtienen después de los primeros minutos de electropulido son los que corresponden al metal después de eliminarse la deformada capa externa.

El pulido electrolítico tiene dos efectos opuestos en relación con la resistencia a la fatiga. La resistencia a la fatiga es mayor cuanto mejor es el acabado superficial. Las dislocaciones en la superficie del metal actúan como zonas de concentración de tensiones que producen roturas por fatiga. En este aspecto, el electropulido tiene un efecto favorable al ir acompañado de un alisado que elimina las dislocaciones finas.

Aparte del alisado de la superficie acabada, la resistencia a la fatiga viene determinada por otras características de la capa superficial del metal. Los tratamientos mecánicos producen una capa de metal endurecido con tensiones de compresión. Cuando se efectúa un acabado mecánico, las tensiones

internas que quedan en la superficie dependen del tipo de acabado y afectan a una capa exterior de 50-100 micras con tensiones del orden de 20-80 kg/mm². La presencia de dicha capa aumenta la resistencia a la fatiga del metal. En la práctica utilizan procedimientos como el temple superficial o el laminado para crear un endurecimiento superficial ¹¹.

El pulido electrolítico tiene un efecto negativo al disolver la capa externa de dicha zona endurecida que tiende a bajar la resistencia a la fatiga del metal. El grado de disminución de la resistencia a la fatiga dependerá de las propiedades del metal, de su estructura, de la capacidad de endurecimiento y del grado de endurecimiento a que ha sido sometido ⁶.

Un método para contrarrestar la reducción de la resistencia a la fatiga será endureciendo el material después del pulido electrolítico de la superficie. De esta forma se pueden obtener efectos beneficiosos al eliminar las diminutas asperezas y cantos de las dislocaciones superficiales.

2.2 Abrasión

La calidad de la superficie (tamaño, forma y distribución de las microasperezas) determina en gran manera la velocidad de desgaste de las superficies de dos metales con deslizamiento relativo. El contacto entre dos superficies se establece entre las microasperezas, de forma que la superficie de contacto real es muy inferior a las superficies geométricas enfrentadas. Ello implica un aumento de presión que provoca la deformación o rotura de las microasperezas. Debe pasar cierto tiempo hasta que las microasperezas de las superficies que deslizan entre sí adquieran una forma y tamaño estables. Con el tiempo, las características de la fricción resultan razonablemente estables.

El pulido electrolítico no solo reduce la altura de las microasperezas, sino que modifica las formas, originando un microrelieve ondulado característico. Al disminuir las microasperezas y adquirir la superficie una forma ondulada, la superficie de contacto al deslizamiento aumenta y la presión de las zonas de contacto disminuye. Como consecuencia disminuye el coeficiente de rozamiento.

2.3 Propiedades Eléctricas y Magnéticas

Los cambios de la microgeometría de la superficie y la eliminación de la superficie endurecida que se realizan durante el pulido electrolítico, produce efecto sobre las propiedades eléctricas y magnéticas del metal. Según información de la literatura sobre el tema, el pulido electrolítico reduce la emisión de electrones en frío. Es decir, que si dos metales se tocan con una presión baja y se someten a una diferencia de potencial, emiten electrones a temperatura ordinaria. Existen indicios de que la emisión en frío se produce en altos gradientes que se originan en las microasperezas de la superficie. Al mismo tiempo, el pulido electrolítico mecánico incrusta partículas de materia extraña que no siempre puede ser deseable. Con el pulido electrolítico es posible alisar una superficie sin inclusiones extrañas. Esta es aparentemente la causa que reduce la emisión de electrones en frío.

El endurecimiento de la superficie del metal reduce su permeabilidad magnética e incrementa las pérdidas por histéresis. Tienen interés con relación al endurecimiento de los perfiles con rebaba, así como al endurecimiento por estampado.

2.4 Resistencia a la Corrosión

Los cambios que el pulido electrolítico produce sobre la superficie de un metal mejoran su resistencia a la corrosión. La capa superficial que se forma con un pulido mecánico se caracteriza no solo por

una deformación estructural, sino por la incrustación de sustancia extrañas, tales como material abrasivo, que favorecen la iniciación y progreso de zonas corroídas; cuando el metal es electropulido, la capa superficial es eliminada por disolución, el tamaño del granulado de la superficie se reduce como consecuencia del cambio del microrelieve y se forma una película pasiva.

Medidas de corrosión comparativas provocadas por el ataque químico de sosa caustica sobre probetas de aluminio del 99.9 de pureza, pulidas mecánicamente usando pastas de pulir y sobre probetas electropulidas con soluciones de ácidos acético y perclórico, muestran que la velocidad de disolución inicial para las primeras es mayor que para las segundas y, después, la velocidad de disolución era por lo menos la misma ^{3, 8, 12, 13}.

El aumento de la resistencia a la corrosión como resultado de un electropulido es debido a la formación de una fina película superficial continua. En el caso de un pulido mecánico, las ralladuras e inclusiones extrañas presentes en la superficie del metal evitan la formación de una película continua de óxido y la pasivación de la superficie es menos efectiva.

2.5 Acabado o Apariencia

El acabado es un proceso de fabricación cuya finalidad es obtener una superficie con características adecuadas para la aplicación particular del producto.

Al igual que es imposible fabricar con exactitud una forma, tampoco es posible obtener con exactitud un acabado superficial perfecto, y por consiguiente éste se encontrará dentro de unos límites más o menos amplios.

De tal manera podemos determinar las imperfecciones y clasificarlas en (Figura 5):

- Rugosidades.- Causadas por las huellas de las herramientas que han fabricado las piezas.
- Ondulaciones.- Originadas por los desajustes en las máquinas que mecanizan las superficies de las piezas.
- Imperfecciones mixtas.- Ambos defectos superficiales aparecen conjuntamente.



Figura 5. Clasificación de las imperfecciones superficiales ¹⁴

Si partimos de la definición general de que “el acabado superficial es todo proceso conducente a modificar y/o mejorar las estética del material”.

Las rugosidades superficiales son el conjunto de irregularidades de la superficie real, definidas convencionalmente en una sección donde los errores de forma y las ondulaciones han sido eliminados.

Clases de rugosidad

Los valores de rugosidad R_a se clasifican en una serie de intervalos N_x (siendo x un número del 1 al 12) según se indica¹⁵ (Tabla 2).

Tabla 2. Clases de Rugosidad ¹⁵

Rugosidad Ra (μm)	Clase de rugosidad
50	N12
25	N11
12.5	N10
6.3	N9
3.2	N8
1.6	N7
0.8	N6
0.4	N5
0.2	N4
0.1	N3
0.05	N2
0.025	N1

Las clases de rugosidad se pueden agrupar, según la apreciación visual o táctil, en los siguientes grados.

- N1-N4: La superficie es especular
- N5-N6: Las marcas de mecanizado no se aprecian ni con el tacto ni con la vista (pero sí con la lupa).
- N7-N8: Las marcas de mecanizado se aprecian con la vista pero no con el tacto.
- N9-N12: Las marcas de mecanizado se aprecian con la vista y con el tacto.

De la Figura 6 podemos observar mediante el microscopio óptico una superficie electropulida, donde vemos la diferencia entre una superficie sin electropulir (Figura 5a) y electropulida (Figura 5b).

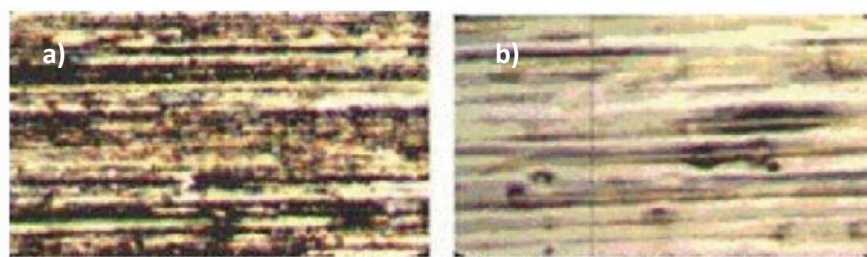


Figura 6. Superficie metálica a) antes y b) después del electropulido ⁷

CAPÍTULO III

Etapas del proceso del pulido electrolítico

La práctica del pulido electrolítico incluye el tratamiento mecánico y químico de las superficies a electropulir, así como las operaciones siguientes. Las operaciones adicionales dependen del objeto que se persigue con el pulido electrolítico.

Para obtener acabados de electropulido de alta calidad, el trabajo debe realizarse en las tres operaciones siguientes:

1. Preparación del metal: Eliminación de aceites, grasas, óxidos y otros contaminantes de la superficie que interfieren con la uniformidad del electropulido.
2. Electropulido: Para suavizar, abrillantar y/o eliminar las rebabas del metal.
3. Tratamiento posterior: Eliminación del electrolito residual y de los productos secundarios de la reacción de electropulido, con posterior secado para prevenir la aparición de manchas.

3.1 Secuencia de operaciones

- Procedimientos generales para electropulido

Para efectuar un electropulido a cualquier material metálico se deben efectuar una serie de operaciones, como se muestra en la Figura 7 y dependen del tipo de aplicación.

La limpieza es necesaria antes del electropulido para quitar la suciedad de la superficie, como óxidos, grasa, aceite, huellas dactilares, manchas de los compuestos empleados en la embutición o en troquelado y manchas excesivas o escamas producidas por calentamiento. Todas las partículas sólidas deben ser quitadas de la superficie, de lo contrario actuarán como aislantes dejando zonas de pulido heterogéneo en la superficie como resultado del pulido electrolítico.

Un soporte o dispositivo sujetador, es un accesorio para mantener las piezas en posición, en un electrolito y conducir las corrientes a las mismas. La función más importante de un soporte es la de llevar corriente a las piezas. El soporte debe estar diseñado de manera que mantenga a las probetas en una posición favorable para que se dé un buen proceso de electropulido de las superficies de interés.

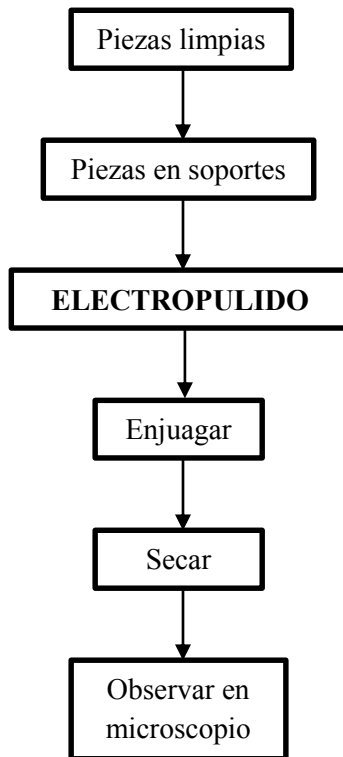


Figura 7. Procedimiento general para pulido electrolítico ⁹

3.2 Tratamientos mecánicos y químicos previos

La estructura de la superficie de un metal tiene influencia sobre los resultados del pulido electrolítico, principalmente sobre la reflexividad del metal. Se obtienen electropulidos satisfactorios en concavidades profundas, planchas de imprenta de cobre, plata alemana, latón y aluminio. Los mejores alisados se obtienen en los casos que la rugosidad inicial es de la clase número 8 hasta la 10.

Los tratamientos químicos previos incluyen la eliminación de la superficie de las trazas de grasa, cascarillas y productos. Las grasas minerales y pastas de pulir se eliminan por lavado con disolventes orgánicos que pueden reemplazarse por soluciones de la composición siguiente:

Soluciones	g/L
Detergente	90-100
Sosa caustica	20-40
Fosfato trisódico	10-20

La solución se usa a 80-90 °C y el tiempo de desengrase es de 5-10 minutos. La solución elimina grasas de origen animal o vegetal. Si se usan disolventes orgánicos, se sigue con un tratamiento electrolítico de desengrase con un baño de:

Soluciones	g/L
Sosa caustica	20
Fosfato trisódico	30
Sosa calcinada	40
Agua	2

A partir de la solución anterior, se describe el procedimiento para ser utilizada en un rango de 80-90 °C, con una densidad de 5-10 A/dm² y el desengrase dura 5-7 minutos. Las piezas a tratar se conectan al cátodo. Si se tratan metales ferrosos se sigue de un tratamiento anódico de 1-2 minutos antes de sacar las piezas del baño. Después de desengrasadas se rocían las piezas abundantemente con agua caliente y después con agua fría. Una superficie bien desengrasada puede quedar uniformemente limpia con agua (Figura 8).



Figura 8. Desengrase de piezas para electropulido a) Lavado con disolventes orgánicos y b) Tratamiento electrolítico de desengrase con baño ⁷

Las cascarillas y los productos de la corrosión pueden eliminarse en el curso del electropulido, aunque no es recomendable, puesto que se necesita más tiempo de electropulido y porque al eliminarse la cascarilla deja unas depresiones que no siempre se eliminan con el electropulido. La cascarilla por lo menos, es mejor eliminada antes del pulido electrolítico con papel de lija fino ¹³.

3.3 Pulido electrolítico

Al suspender las piezas del bastidor anódico debe hacerse de forma que no se acumulen las burbujas de gas en las concavidades y de forma que unas piezas no apantallen a otras. Si no se eliminan fácilmente las burbujas de gas del ánodo se origina una disolución no uniforme y aparecen surcos y hoyos.

Las piezas se sumergen a una profundidad tal que las partes superiores queden a 10 o 20 mm por debajo del nivel de la solución. La distancia entre cátodo y ánodo es usualmente de 50 a 150 mm. Cuando las piezas son de forma complicada se distancian más los electrodos para conseguir un efecto uniforme.

La uniformidad en la disolución del metal depende también de la posición relativa de cátodo y ánodo. Si el borde inferior del cátodo es apreciablemente más bajo que el borde de la pieza a electropulir, se concentran las líneas de corriente en la parte baja y la disolución de metal en la parte baja es superior a la del extremo superior de la pieza. Para dar uniformidad a la disolución de metal se usan pantallas metálicas que se colocan en la vecindad de los ángulos y cantos vivos de las piezas a electropulir ⁸.

La calidad del electropulido depende también de la temperatura de trabajo. Un calentamiento local de la solución o del ánodo provoca un mordentado sobre la superficie tratada. Para evitar este efecto se puede agitar el baño o moverlo con una bomba. Estos métodos exigen un incremento de la densidad de corriente y un equipo de material. Cada tipo de pieza a tratar necesita el utillaje adecuado (Figura 9) ^{1, 16}.



Figura 9. Pulidor electrolítico para piezas pequeñas ⁷

3.4 Tratamientos posteriores al pulido electrolítico

Los tratamientos posteriores al electropulido dependen de si el pulido es el objeto final o una operación intermedia antes de una electrodeposición. En el primer caso se rocían con agua abundante y secan con serrín caliente o trapos.

Si las piezas electropulidas son de acero, después de lavarlas con agua se tratan durante 10-15 minutos con una solución de sosa caustica al 10 % y a 60-80 °C, que mejora la continuidad de una película de óxido pasivo, lo cual le confiere una gran resistencia a la corrosión. Evita también el deslustrado y la aparición de zonas mates. El secado y limpieza que siguen se efectúa como se ha mencionado antes.

Si después del electropulido la pieza debe recubrirse electrolíticamente, la película de óxido formada debe eliminarse para facilitar la adherencia del metal a electrodepositar y en algunos casos exige un tratamiento de decapado electrolítico. Después del electropulido o del decapado, si ha sido necesario, las piezas se sumergen 10-20 segundos en una solución al 5 % de ácido sulfúrico. Después se lavan con agua y se recubren electrolíticamente. Si pasa mucho tiempo entre el electropulido y el recubrimiento deben desengrasarse e incluso decaparse antes del recubrimiento.

3.5 Equipo y material para el pulido electrolítico

- **Requerimientos del local para la celda electrolítica**

La ambientación de un local de electropulido dentro de un espacio físico es un asunto de considerable importancia. Se le debe situar en relación con las operaciones de pretratamiento y postratamiento para obtener un flujo uniforme de las piezas a la entrada y salida, con un mínimo manejo y almacenamiento temporal. Además, se deben considerar dos factores controladores del diseño que implican la habilidad, en primer lugar para extraer los humos corrosivos y perjudiciales sin peligro para el personal de laboratorio o de los alrededores y segundo descargar las aguas del enjuagado y encargarse de las sustancias químicas que se puedan derramar sin daño al personal o al medio ambiente.

Se prefiere la localización en un piso bajo, pero esto requiere que todas las fuentes de humos sean dirigidas al exterior por medio de chimeneas lo suficientemente altas para librar la parte superior del edificio y llenar los requerimientos locales. La colocación en el piso superior favorece la extracción de los humos pero requiere un mantenimiento muy cuidadoso de los tanques, pisos, drenajes, sumideros, y tuberías para evitar fugas y daños en los pisos inferiores.

Cualquier instalación de electropulido, independientemente de su tamaño, deberá contar con los siguientes requerimientos fundamentales:

-
-
1. Almacenamiento de las probetas
 2. Espacio para almacenamiento de los reactivos
 3. Área adecuada para el procesado que incluye prelimpieza, electropulido, y tratamientos posteriores
 4. Espacio adecuado para la inspección de las probetas
 5. Área protegida para la colocación de la fuente
 6. Área adecuada para la disposición de las aguas residuales
 7. Espacio para lavabos

En general, un sistema operado manualmente no encuentra dificultades en cuanto a la altura del techo, porque la profundidad de los soportes está limitada por la longitud del brazo del operador y aún con una plataforma elevada alrededor de los tanques es suficiente un promedio de altura de techo de 2.5 a 2.75 m. Sin embargo, con dispositivos de transferencia mecánica tales como soportes elevadas, pueden emplearse con ventaja soportes más profundos y la altura de techo deberá ser considerada como un factor limitador.

El piso del local deberá ser construido de material de concreto, o baldosas (azulejos), ya que los pisos absorbentes de madera u otros materiales similares pueden ser peligrosos, sobre todo cuando las soluciones ácidas se han secado, y la madera puede ser sensible a la ignición por medio de la fricción.

- ***Equipo para pulido electrolítico***

La mayor parte del equipo de electropulido utiliza materiales estándar de construcción. La instalación para el electropulido tiene la apariencia a un taller de galvanotecnia, pero el electropulido tiene unos cuantos requisitos especiales ^{6, 17, 18}:

1. Debido a las densidades de corrientes más elevadas, la barra conductora y la estructura de los soportes deben ser más 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 más, por lo común, que los baños para depósitos electrolíticos.
3. La contaminación y las impurezas son un problema mucho menor.
4. La barra de las piezas está conectada a la terminal de C.C y los otros electrodos son cátodos.
5. Por lo común, la conductividad del electrolito es baja, de manera que los voltajes son mayores y el efecto de calentamiento es más grande.

Se necesita una fuente de alimentación de corriente continua que normalmente es un equipo de rectificación de tensión alterna. El voltaje debe poder regularse hasta 12 V, y las gamas de intensidad necesarias pueden ser según la importancia de la instalación de 250-500 A, 500-1000 A, 750-1500, o, 2500-5000 A. Debe tenerse en cuenta que el ambiente de la sala de cubas puede afectar el equipo de rectificado oxidándolo.

Las cubas electrolíticas deben ser resistentes a la corrosión del electrolito y estar provistas de un sistema de calefacción y de limpieza de barras. Los materiales de revestimiento de las cubas para soluciones que contengan ácidos sulfúrico, fosfórico y crómico son: plomo, cerámica resistente a los ácidos, porcelana, plásticos vinílicos, politeno y esmaltes vítreos. Si contienen ácidos fosfórico y crómico: cerámica resistente a los ácidos, politeno y porcelana. Si las cubas han de contener soluciones alcalinas: porcelana, esmaltes vítreos, plásticos vinílicos, politeno, fibra de vidrio, resina y poliéster.

Las más económicas son las cubas revestidas de plástico vinílico. El equipo para calentar el baño debe ser de cierta potencia para acortar el tiempo de calentamiento, y puede consistir en un arrollamiento de plomo en el fondo de la cuba o en un arrollamiento de acero recubierto de plomo. Dichos arrollamientos protegen la resistencia eléctrica de calentamiento. Pueden ser también resistencias protegidas por cubas de vidrio, plomo o cuarzo.

Los plásticos vinílicos pueden doblarse y soldarse bien para darles la forma requerida. Los bordes superiores del revestimiento es preferible reforzarlos con angulares del mismo material. Si la cuba o tanque no es de material revestido sino que la misma plancha vinílica constituye la propia cuba, debe reforzarse exteriormente con perfiles de hierro, sobre todo si el baño ha de calentarse a 70-75 °C.

Otro modelo de cuba es el formado por un depósito de plancha pequeñas y con arena entre el hierro y el plástico que, además de constituir un aislante térmico, evita las excesivas deformaciones del plástico al calentar el baño. Para definirse las dimensiones de la cuba debe tenerse en cuenta que la densidad de corriente en el baño no debe ser mayor de 1-2 A/L.

Las tinas para electropulidos son parecidas a las cubas electrolíticas para otros fines. Cuando se utilizan baños cianurados o soluciones calientes, deben preverse sistemas de ventilación que recojan los vapores de las cubas y eviten la concentración de dichos vapores en la sala de cubas. Para las conducciones de gas es mejor utilizar tubos de plástico vinílico que otros materiales que puedan corroerse. El control y regulación de la temperatura de la cuba se pueden automatizar fácilmente.

Para el electropulido de un solo tipo de piezas se pueden automatizar o semiautomatizar las distintas operaciones que en muchas ocasiones pueden reducir el trabajo del operador al de colocar y retirarlas piezas de los bastidores.

El equipo y disposición para el electropulido generalmente llegan a parecerse a una instalación de electrorecubrimientos (Figura 10).

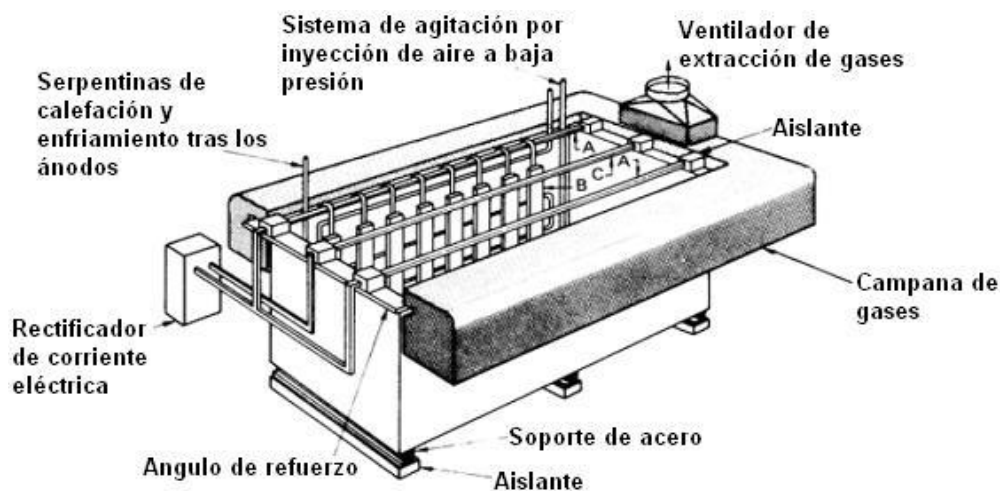


Figura 10. Tanque para electropulido ¹⁹

- ***Tina para electropulidor***

Los materiales usados para construcción de los tanques deben ser químicamente resistentes al líquido (electrolito) que vaya a contener, a menos que se use un revestimiento, en cuyo caso el revestimiento debe llenar este requerimiento. En cualquier caso el líquido no debe ser contaminado.

Tanto el material de construcción como el uso del revestimiento, son determinantes en el diseño de un tanque. Los materiales más comunes para los tanques son: la madera, plástico, vidrio, cerámica, concreto y acero (Figura 11).



Figura 11. Tanque de PVC ²⁰

Para baños ácidos está forrado por lo común con plomo químico. También se puede emplear acero inoxidable tipo 316. 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 cátodos o dos filas de piezas y tres cátodos. 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 cátodos y a las piezas deben estar separadas del tanque por medio de aisladores no absorbentes tales como porcelana, vidrio o fluropolímeros. La madera y los plásticos absorben baño electropulidor y ocasionan corto circuito en el tanque.

La Figura 12 es un ejemplo del bordeado que debe de hacerse para una construcción de un tanque pequeño.

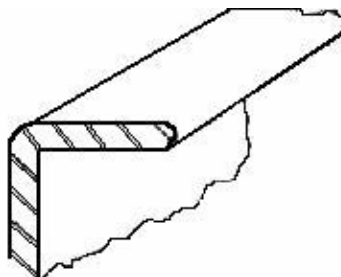


Figura 12. Bordeado doblado para la construcción de tanques pequeños ⁹

- **Los cátodos**

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

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

- **Los serpentines**

Están hechos de acero inoxidable tipo AISI-317 de plomo químico, poco calor será necesario para mantener la temperatura de operación si el tanque es trabajado con la cantidad adecuada de A/L.

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

- **Agitación**

Cuando se utiliza, la agitación se obtiene por un sencillo movimiento oscilatorio de la barra de trabajo que es el método más 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 través de las superficies de las piezas. La agitación aumenta la velocidad del electropulido acortando así la duración del proceso.

- **Soportes y bastidores**

Un soporte o dispositivo sujetador para ánodos y cátodos, es un accesorio para mantener las piezas en posición, en un electrolito y conducir las corrientes a las mismas.

Los soportes pueden ser de cobre desnudo. La función más importante de un soporte es la de llevar corriente a las piezas, 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, 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 (Figura 13).

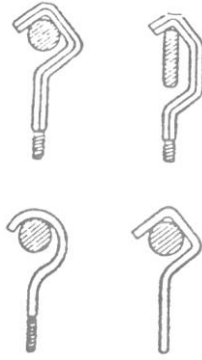


Figura 13. Soporte para sujetar las piezas ¹⁷

- **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.

- **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:

- 1) La distancia desde los cátodos a la pieza
- 2) El número de A/gL de baño
- 3) La densidad de corriente sobre la pieza para el electropulido
- 4) La densidad de corriente del cátodo
- 5) La temperatura
- 6) La agitación

La Figura 14 muestra un esquema general de una celda para pulido electrolítico, así como sus componentes.

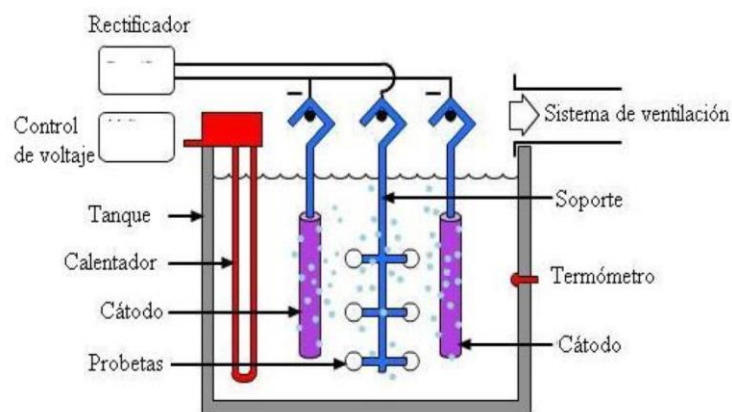


Figura 14. Esquema general de una celda electrolítica para pulido ²¹

3.6 Aspectos técnicos y económicos

El electropulido mejora ciertas características, principalmente la reflexividad, el coeficiente de rozamiento, propiedades magnéticas y resistencia a la corrosión. Por ello resulta muy apropiado para ciertas operaciones. También puede ser aconsejable para sustituir pulidos y otras operaciones que aunque se pueden efectuar mecánicamente, resultan más económicas por electropulido.

La productividad de una instalación de electropulido no depende del tamaño de las piezas a tratar, sino más bien del tamaño de los tanques y de la potencia de la fuente de alimentación. La simplicidad y flexibilidad del equipo y la posibilidad de efectuar simultáneamente el electropulido de gran número de piezas con pocos tipos, puede aventajar económicamente a otras formas de acabados de piezas. El electropulido puede resultar muy ventajoso para acabados con fines decorativos, para abrillantar recubrimientos electrolíticos, para el tratamiento de herramientas de corte, piezas de la industria textil y varios artículos de consumo.

Al sustituir pulidos de ciertas piezas de motocicletas por electropulidos dentro de la misma sala de electrodeposiciones reduce operaciones y consumo de materiales. El tiempo de fabricación de una pieza de bicicleta es reducido en 21.2 minutos. El tiempo medio para el pulido de ciertos muelles mediante un arenado es reducido de 1.5 minutos a 5 segundos. El consumo de energía eléctrica es reducido a la quinta parte.

Un análisis de los costos directos del electropulido del acero muestra que el costo principal es debido a la necesidad de renovar frecuentemente el baño por envejecimiento. Los recientes métodos de regeneración del baño han bajado los costos de producción del electropulido.

Desde el punto de vista técnico y económico, el pulido electrolítico permite ^{6, 8-10, 22, 23} :

1. Tratar piezas de forma irregular y de gran tamaño, en un tiempo corto y con gran ahorro de mano de obra.
2. Aumentar la resistencia a la corrosión ya que el proceso permite eliminar las capas superficiales formadas por labores de laminación y pulido, dejando sobre la superficie terminada una capa de óxidos de cromo y níquel extremadamente delgada y transparente que el confiere una excelente pasividad en relación con numerosos reactivos químicos.
3. Eliminar la coloración debida a procesos de soldadura o calentamiento, ahorrándose el proceso manual de su eliminación. Cabe señalar, sin embargo, que si se desea una terminación uniforme, se debe realizar un decapado previo con el desoxidante-pasivador.
4. Disminuir la tendencia en los líquidos y sólidos a adherirse a la superficie, mejorando los aspectos de limpieza y escurrido de las mismas, aspectos muy importantes en intercambiadores de calor, evaporadores, etc.
5. Pulir piezas intrincadas, en las que el pulido mecánico resulta inaccesible. Esto es posible lograrlo en un solo tratamiento, proporcionando un aspecto uniforme en toda la superficie, lo cual sería difícil de lograr mediante métodos convencionales.
6. Disminuir el tiempo y costo del pulido, debido a la posibilidad de automatización del proceso, ahorro en insumos y mano de obra.

CAPÍTULO IV

Aplicaciones del pulido electrolítico

Las aplicaciones del pulido electrolítico son muy diversas sin embargo la mayor importancia se da como medio para la investigación y para la industria.

Investigación

Se emplea en investigaciones sobre óptica, sobre propiedades magnéticas y particularidades electrolíticas, así como para los estudios de difracción electrónica. La corrosión y resistencia al envejecimiento depende en gran parte del estado de la superficie ¹³.

Como ejemplo en la investigación no resulta suficiente un pulido mecánico de preparación de las superficies. El pulido mecánico, en un mayor o menor grado, deforma la estructura de la superficie y forma una capa superficial endurecida. En estas condiciones, el examen de la superficie no queda suficientemente correlacionado con la estructura del material. En muchos casos debe recurrirse al electropulido como etapa preparatoria para observar mejor tal cual es en realidad la estructura e interpretar mejor las propiedades relacionadas con la microestructura cristalina de un determinado material.

Industria

El empleo del pulido electrolítico industrial es debido a veces para mejorar propiedades funcionales de las partes tratadas, y otras, por las ventajas económicas que representa la sustitución de un pulido mecánico por el pulido electrolítico. El pulido electrolítico en un gran número de industrias se utiliza con fines decorativos, acabados de piezas de motocicletas, instrumentos y equipos médicos y en joyería, a la mejora de su superficie, sin contaminación, sin partículas y con propiedades antiadherentes. El pulido electrolítico ha dado resultados muy satisfactorios para la fabricación de herramientas de corte y de ciertas partes de piezas que trabajan a fricción ^{6, 8, 11, 13, 19}.

Si el objetivo es un acabado agradable estéticamente, un electropulido de alta calidad se puede evaluar, por lo general, con una inspección visual. Una evaluación microscópica de la superficie es necesaria, sin embargo, cuando se requiere el más alto grado de acabado y es necesario que el estado de la superficie se documente para una evaluación futura.

De acuerdo con las características del proceso de pulido electrolítico, algunas de las áreas en el que se emplea son:

- Industria alimenticia en general, fundamentalmente láctea, cervecera, vitivinícola y frigorífica.
- Industrias química, del plástico, mecánicas, fotográfica, textil y del cuero.
- Fabricantes de instrumental quirúrgico y odontológico
- Fabricantes de máquinas y elementos para la industria papelera
- Fabricantes de elementos ópticos, prótesis médicas, máquinas envasadoras, accesorios marinos, herramientas de corte, etc.



Figura 15. Aplicación típica del electropulido ⁷

4.1 Acabado decorativo

El acabado es un proceso de fabricación empleado en la manufactura cuya finalidad es obtener una superficie con características adecuadas para la aplicación particular del producto que se está manufacturando; esto incluye mas no es limitado a la cosmética del producto. En algunos casos el proceso de acabado puede tener la finalidad adicional de lograr que el producto entre en especificaciones dimensionales.

Antiguamente, el acabado se comprendía solamente como un proceso secundario en un sentido literal, ya que en la mayoría de los casos sólo tenía que ver con la apariencia del objeto u artesanía en cuestión, idea que en muchos casos persiste y se incluye en la estética y cosmética del producto.

En la actualidad, los acabados se entienden como una etapa de manufactura de primera línea, considerando los requerimientos actuales de los productos. Estos requerimientos pueden ser ^{8, 19, 24, 25}.

- Estética.- El más obvio, que tiene un gran impacto psicológico en el usuario respecto a la calidad del producto.
- Liberación o introducción de esfuerzos mecánicos.- Las superficies manufacturadas pueden presentar esfuerzos debido a procesos de arranque de viruta, en donde la superficie se encuentra deformada y endurecida por la deformación plástica a causa de las herramientas de corte, causando esfuerzos en la zona superficial que pueden reducir la resistencia o inclusive fragilizar el material. Los acabados con remoción de material pueden eliminar estos esfuerzos.
- Eliminar puntos de iniciación de fracturas y aumentar la resistencia a la fatiga. Una operación de acabado puede eliminar microfisuras en la superficie.
- Propiedades mecánicas de su superficie.
- Protección contra la corrosión.
- Rugosidad

El acabado decorativo por pulido electrolítico está indicado en los siguientes casos:

- El abrillantado de piezas de materiales difíciles de pulir mecánicamente, como el acero inoxidable;
- El abrillantado de formas complicadas;
- El abrillantado de grandes producciones de piezas;

-
-
- El abrillantado de metales preciosos;
 - El abrillantado de superficies a recubrir electrolíticamente;
 - El abrillantado de recubrimientos electrolíticos.

Una de las cualidades específicas del pulido electrolítico es la posibilidad de abrillantado (no de alisado) de una superficie independientemente del grado de rugosidad. Los mejores resultados se obtienen cuando las piezas a electropulir tienen una forma cilíndrica o esférica. Cuando deben pulirse uniformemente grandes superficies planas, los efectos decorativos ya son más difíciles de obtener. Los mejores resultados con propósitos decorativos se obtienen sobre relativamente pequeñas superficies con rugosidades de grado número 9 y número 10.⁸

Si el pulido electrolítico constituye el tratamiento final de un acabado debe añadirse una operación que mejore más la resistencia a la corrosión. Tiene particular importancia sumergir el acero electropulido en una solución al 10 % de sosa caústica. También se mejora la resistencia a la corrosión bañando el acero electropulido con aceite mineral.

El uso del pulido electrolítico para la protección y acabado decorativo de superficies electrodepuestas disminuye el número de operaciones y mejora la adhesión de las capas electrolíticas. Se reduce también el número de desengrasados y rociados, así como las operaciones de colocación y retirado de las piezas.

En la operación del pulido electrolítico como operación previa a la electrodeposición, debe atenderse a la rapidez y precisión de las operaciones a efectuar. Después del electropulido, el material debe rociarse rápidamente con agua, tratarse con una solución del 3-5 % de ácido sulfúrico, volver a lavar y sumergirlo rápidamente en el baño de recubrimiento. No debe permitirse una larga exposición al aire; el tratamiento con el ácido sulfúrico no debe prolongarse demasiado para evitar un ataque químico.

El acabado de metales preciosos- oro y plata- por electropulido tiene un especial interés. El pulido reduce la pérdida de material al mínimo y, además, queda en el baño, de donde se puede recuperar.

4.2 Pulido electrolítico de piezas sometidas a fricción

La fricción se define como la resistencia al movimiento durante el deslizamiento o rodamiento que experimenta un cuerpo sólido al moverse sobre otro con el cual está en contacto.

La fricción depende de:

1. La interacción molecular (adhesión) de las superficies
2. La interacción mecánica entre las partes
3. La reducción del coeficiente de rozamiento que se obtiene electropuliendo piezas sometidas a fricción ha generalizado su empleo. Muchas piezas de la industria textil se electropulen.

Se utilizan soluciones de ácidos fosfórico, sulfúrico y crómico a temperaturas de 60-80 °C, con una densidad de corriente anódica de 40-50 A/dm² y con 5-10 minutos de duración. Se puede emplear el electropulido para acabar los aros de las máquinas de hilar y de tejer, cortadoras mecánicas, varias piezas de las máquinas de cardar, etc.

Las anillas de las máquinas de hilar son de acero al carbono templadas y revenidas. La finura de dichas anillas no puede ser de clase más baja del número 10-12. Al colocarlas en la máquina necesitan

tres o cuatro meses de trabajo antes no se han auto-acabado por el rozamiento del propio hilo, y este periodo resulta ser un 10 % de la vida útil de la anilla.

Durante el periodo de rodaje, la velocidad de la maquina debe reducirse un 5-10 % a base de reducir la velocidad de las ruedas de arrastre. Son frecuentes las roturas de hilos que reducen la productividad y la calidad del trabajo. El electropulido reduce el tiempo de rodaje de 6 a 7 veces menos. Permite el trabajo de la maquina a plena velocidad, reduciendo las roturas en un 6-7 %. El electropulido de las agujas de la lanzadera aumenta la velocidad alcanzable un 14 %.

El empleo del electropulido permite prescindir del pulido mecánico con mejores resultados en relación con las pérdidas de materia prima. Es de esperar que el electropulido pueda demostrar su efectividad como sistema de acabado de otras piezas de máquinas expuestas al desgaste.

4.3 Pulido electrolítico de herramientas de corte

La resistencia al desgaste de las herramientas depende del metal a mecanizar y del alisado y condiciones de las superficies del filo. Al trabajar, la herramienta está sujeta a un bruñido abrasivo. El calentamiento local producido por la abrasión origina cambios estructurales de la superficie del metal, reduce su dureza y se producen muescas. En total, se reduce la vida útil de la herramienta.

Para mejorar la calidad de las herramientas de corte se pueden emplear tratamientos químicos y electrolíticos para eliminar la superficie deteriorada. No obstante, con ello pueden perjudicarse zonas del metal que aún están en buen estado. En los últimos años, el electropulido ha encontrado aplicaciones para el acabado de las herramientas de corte. La eliminación del material no implica la corrosión del que queda. El espesor de la capa a eliminar se puede controlar con precisión, permitiendo mantener prácticamente intactas las dimensiones de la herramienta de corte, manteniéndola durante más tiempo dentro de los límites de tolerancia. Puesto que el electropulido tiene tendencia a eliminar las microasperezas salientes, el alisado de las caras cortantes por electropulido mejora el trabajo de la herramienta al mejorar las condiciones de deslizamiento que se verifica entre herramienta y metal.⁸

4.4 Pulido de instrumentos de medida

En la fabricación de instrumentos de medida se puede emplear el electropulido para afinar dimensiones entre tolerancias preestablecidas. A continuación describimos el desarrollo de un método electrolítico para control de dimensiones de galgas cilíndricas.

Las galgas para electropulir deben cumplir las condiciones siguientes: el alisado de la superficie n puede tener un número de clase inferior a 10 y la tolerancia del acabado de las galgas de clase 1 y 2; las precisiones deben ser de 0.02-0.03 del diámetro. El éxito del acabado electrolítico depende en primer lugar de la longitud que es posible controlar y la uniformidad del vaciado de metal que deja las dimensiones entre las tolerancias requeridas. Aparte de un estricto control de las condiciones de trabajo, es muy importante la posición relativa de los electrodos. Si dicha corriente no se distribuye uniformemente, se cambia la forma geométrica de la galga. El vaciado más uniforme de metal se consigue colocando el extremo superior de la galga a unos 6 mm de la superficie del aro, y el extremo del cilindro, que no trabaja como galga, efectúa el papel de pantalla tanto mejor cuanto más sobresale, por debajo, al cátodo en forma de tubo.

Las galgas se pulen en una solución que contiene ácidos fosfórico, sulfúrico y crómico. La densidad de corriente anódica es de 70 A/dm², la temperatura de 70 ± 1 °C y el electropulido dura unos 3

minutos. Se ha comprobado que, con un estricto control de las condiciones de trabajo, es posible electropulir galgas con una precisión dimensional y de finura de la superficie de clase 1 y 2.

4.5 Mejora del alisado de superficies

Con relación al pulido electrolítico ya se ha dicho que cabe distinguir dos facetas, la de provocar un aumento de reflexividad y la del electroalisado que elimina las asperezas superficiales aumentando el alisado de la superficie. Normalmente, el electropulido y el electroalisado se provocan al mismo tiempo; es el caso del acero, cobre y latón. También se conocen procesos que permiten alisar una superficie sin aumentar la reflexividad. Para ambos casos se puede emplear la disolución anódica para provocar un mejor alisado de la superficie.

El grado de eliminación de microasperezas depende de la naturaleza del metal, de su alisado inicial y de las condiciones de trabajo del tratamiento electrolítico.

El electropulido es una técnica mediante la cual se logra el alisamiento de una superficie metálica, haciendo que ésta actúe como ánodo de una celda electrolítica, disolviéndose las irregularidades que la superficie pueda tener. Las rugosidades de dicha superficie conducen mayor cantidad de electricidad que el resto, de manera que en esas áreas el material se disolverá más rápidamente, obteniéndose como resultado una superficie más lisa.

Las condiciones de voltaje, cantidad de tiempo que dura el procedimiento y temperatura, deben ser controladas, a fin de obtener un mejor alisamiento y brillo en la superficie tratada.

Si este tratamiento es aplicado a aleaciones tales como acero inoxidable, se obtienen beneficios extra, ya que los átomos de hierro se disuelven más fácilmente, aumentando la cantidad de níquel y cromo en la superficie, de manera que se obtiene mayor resistencia a la corrosión en el material tratado.

Si consideramos una superficie sin tratar, veremos que existen irregularidades macroscópicas que podríamos llamar valles y picos. Además, si observamos la misma superficie microscópicamente, tenemos que también existen irregularidades que se sobreponen a esos picos y valles.

Según las características de estas irregularidades, se ajustarán los parámetros del electropulido, con el fin de conseguir los mejores resultados, eliminando la mayor cantidad posible de rugosidades. Con esta técnica, no sólo se logra el alisado de la superficie en cuestión, sino que también se logra darle brillo, cuando son eliminadas las irregularidades más pequeñas.

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 de brillo. No puede deducirse tampoco que un mayor brillo no siempre signifique un alisado de las asperezas aunque el mecanismo de los procesos puede y de hecho es diferente. Puede distinguirse el proceso de alisado de la superficie sin abrillantado y el proceso de electropulido que provoca el brillo.

El alisado de la superficie del ánodo durante el tratamiento electrolítico es debido a la diferencia de velocidad de disolución entre puntas y depresiones, efecto que puede incrementarse por el mayor enriquecimiento de la capa anódica de sales del metal.

4.6 Pulido electrolítico de laminados

Se conoce como laminación o laminado al proceso industrial por medio del cual se reduce el espesor de una lámina de metal o de materiales semejantes con la aplicación de presión mediante el uso de distintos procesos, como la laminación de anillos o el laminado de perfiles. Por tanto, este proceso se aplica sobre materiales con un buen nivel de maleabilidad.

El laminado puede ser en frío o en caliente. El laminado en caliente es el que se realiza con una temperatura bastante mayor a la de la recristalización que tiene el metal.

Además de su empleo como tratamiento de acabado, el electropulido puede emplearse en sustitución de un decapado químico para eliminar incrustaciones y productos de la corrosión de laminados. Puede incrementar la soldabilidad y cambiar la forma geométrica (a pequeña escala) de un metal.

La mejora de características a la deformación plástica se ha observado con el electropulido de acero al carbono, acero inoxidable austenítico o ferrítico y en algunas aleaciones de cobre. El electropulido es un tratamiento útil para el acabado del molibdeno. Las planas de molibdeno se rayan y fisuran en las primeras deformaciones de manufactura a que se someten, pero pueden soportar grades deformaciones después de un tratamiento anódico con soluciones de ácidos sulfúrico y ortofosfórico. Al parecer, dicho efecto se consigue por que el material queda con grandes tensiones internas y contienen incrustaciones que el tratamiento electrolítico elimina de la superficie del metal.

El electropulido, en algunos casos, ahorra operaciones de decapado y recocido. Además, la mejora del alisado superficial alarga la vida de las herramientas empleadas para trabajar el material.

Tiene un interés considerable aplicar el electropulido en el trefilado de alambres finos. La producción de alambres finos por trefilado presenta serios problemas cuando el metal se oxida fácilmente. Electropuliendo el material en plantas especiales se pueden reducir alambres de 0.025 mm de diámetro a diámetros de unas pocas micras. Los alambres de torio, uranio y niobio se obtienen con una gran finura superficial y resisten el deslustrado mucho tiempo.

CAPÍTULO V

Pulido electrolítico de algunos metales

El éxito de un electropulido, en cuanto a su apariencia y costo, requiere metales con una estructura uniforme de grano fino, libre de grietas, inclusiones no metálicas y otras materias no homogéneas. Las aleaciones de fases múltiples no se electropulen bien en baños comerciales ⁴.

Las fases ricas en silicio, plomo o fósforo ocasionan dificultades. En la mayoría de los metales laminados es difícil lograr un buen electropulido si hay una reducción en cualquiera de las operaciones, un recocido inapropiado entre pasadas en frío, un decapado excesivo, pasadas de laminación con un alto porcentaje de trabajo en frío, descarburación de la superficie y esmerilado o laminado sobre rodillos sucios. Los cortes profundos hechos en el torno, fresadora, conformadora o esmeril son perjudiciales para un buen electropulido, como también lo es la limpieza por chorro de arena o de granalla en cualquier forma.

A continuación se mostraran algunos de los principales baños de pulido electrolítico del acero, cobre, níquel, aluminio, zinc, plata entre otros ¹⁷.

5.1 Pulido electrolítico del acero

Para electropulir el acero, se han divulgado varios electrolitos. Recientemente han aparecido en la literatura técnica electrolitos con aditivos orgánicos: agar-agar, gelatina, cola, etc. Así, por ejemplo, un electrolito recomendado para el pulido del acero contiene 1 litro de ácido ortofosfórico, 40 g de ácido oxálico y 40 g de gelatina. Estos aditivos actúan de inhibidores reduciendo el mordentado del ácido y favorecen el brillo de la superficie.

Pocos de los electrolitos de laboratorio o comerciales han encontrado una actual aplicación práctica. Actualmente, los principales electrolitos utilizados para el pulido del acero, contienen, como constituyentes principales, ácido perclórico, ácido sulfúrico, ácido cítrico y ortofosfórico.

El ácido perclórico se usa con aditivos orgánicos como el alcohol etílico, la acetona o el anhídrido acético. La baja conductividad del electrolito obliga a emplear voltajes de 50-100 V de corriente continua. Se utiliza a 20-25 °C. Si la temperatura es mayor, el ácido perclórico se deshidrata rápidamente, oxidando cualquier aditivo orgánico presente. La descomposición del ácido perclórico puede ser explosiva. Cuando se usan electrolitos con ácido perclórico deben vigilarse todas las operaciones.

La siguiente Tabla 3 indica las composiciones y condiciones de trabajo para el electropulido del acero.

Tabla 3. Composición del electrolito y condiciones de trabajo para el pulido electrolítico del acero ⁸

Composición del electrolito %	Corriente anódica (A/dm ²)	Temperatura del electrolito (°C)	Tiempo de tratamiento (minutos)	Material
Ácido perclórico 20 alcohol etílico 80	13-40	20-25	0.1-0.2	Acero inoxidable y acero al carbón

Ácido sulfúrico 50 glicerina 40 agua 10	100	82	8	Acero inoxidable
Sulfúrico 15-20 ortofosfórico 63-70 agua 13-22	5-50	43-54	5-10	Acero inoxidable
Ácido perclórico 20-30 anhídrido acético 80-70	15-30	20-25	5-15	Acero inoxidable aceros al carbón
Ácido sulfúrico 15-40 ácido ortofosfórico 50-10 glicerina 12-45 agua 23-5	20-100	50-70	2-8	Acero inoxidable aceros al carbón
Ácido ortofosfórico 70-80 agua 30-20	15-45	35-100	5-10	Acero inoxidable aceros al carbón
Ácido ortofosfórico 86-88	5-10	50	30	Aceros al carbón
Ácido ortofosfórico 45-60 ácido sulfúrico 40-20 agua 12-20	50-100	40-80	5-10	Aceros al carbón
Ácido perclórico 5 ácido acético glacial 95	10-30	20	5-15	Aceros al carbón y aleados

Una cualidad de los electrolitos basados en ácidos sulfúrico y cítrico es la estabilidad y la facilidad con la que puede mantenerse la composición del baño que de otra forma disolvería compuestos del hierro.

A ciertas concentraciones, el ácido sulfúrico puede descomponer el ácido cítrico formando ácido fórmico y ácido acetodicarboxílico. Las soluciones basadas en ácido sulfúrico y cítrico son recomendables en particular para tratar el acero.

Layner V. I.²⁶ mencionó que pueden obtenerse buenos resultados electropuliendo el acero inoxidable con soluciones que contengan glicerina y ácido ortofosfórico o cierta proporción de dichos ácidos.

Pueden utilizarse las composiciones que siguen:

1	%	2	%
Ácido sulfúrico	50	Ácido sulfúrico	16
Glicerina	40	Ácido ortofosfórico	13
Agua	10	Glicerina	56
		Agua	15

Estas soluciones se usan a 80-90 °C con una densidad de corriente de 30-100 A/dm² y un tiempo de 3-9 minutos. El acero inoxidable al cromo-níquel del tipo 18-8 puede electropulirse con un electrolito que contenga ácido ortofosfórico y glicerina.

Ácido ortofosfórico	86-88
Ácido crómico	12
Agua	0-2

Para preparar la solución, se añade ácido crómico al ácido ortofosfórico derretido y se calienta el conjunto a 80-100 °C durante 2 o 3 horas. El electropulido, con una densidad de corriente de 5-10 A/dm² y temperatura del baño de 50 °C durante 30 minutos. El voltaje es de 10-15 V. Para el

electropulido del hierro, acero, cobre y aleaciones de cobre es muy importante agitar fuertemente el baño.

Los aceros al carbono pueden pulirse con menor proporción de ácido ortofosfórico. La composición puede ser:

	%
Ácido ortofosfórico	74-80
Ácido crómico	13-10
Hierro	1
Agua	12-19

Condiciones de trabajo: temperatura 70 °C; densidad de corriente anódica 5-20 A/dm²; tensión de unos 8-12 V.

- *Condiciones de trabajo para el electropulido*

Las condiciones del electropulido incluyen: densidad de corriente anódica, temperatura de la solución y tiempo de tratamiento. Estas condiciones dan lugar a un gran número de combinaciones y resultados del tratamiento sobre el alisado y brillo de la superficie del metal.

Layner V. I.²⁷ apunta que la densidad mínima de corriente con la que se puede obtener un acabado brillante electropuliendo el acero con un baño que contenga ácidos fosfórico, sulfúrico y crómico es de unos 7 A/dm².

Grilijes S. Y., Bogorad L. Y. y Arson R. S.²⁸ investigaron el efecto de la densidad anódica de corriente, la temperatura y el tiempo de tratamiento para el alisado de la superficie del acero. El electrolito para dicha investigación era: 65 % de ácido fosfórico, 15 % de ácido sulfúrico, 6 % de ácido crómico y 14 % de agua. Los resultados están reflejados en la siguiente Tabla 4.

Tabla 4. Efecto de la densidad de corriente sobre el alisado y el rendimiento de la corriente⁸

Alisado de la superficie H _{max} en micras						
Densidad de corriente anódica (A/dm ²)	Tiempo de tratamiento (min)	Antes del pulido	Después del pulido	Alisado relativo %	Velocidad de alisado (micras/min)	Rendimiento de la corriente
10	50	26.0	12.8	51	0.264	65.8
25	20	21.6	11.0	49	0.530	53.7
50	10	27.1	13.2	51	1.390	43.3
100	5	24.5	12.8	48	2.340	38.1

Como se puede apreciar, al aumentar la densidad de corriente, se reduce el tiempo de tratamiento, baja el rendimiento de la corriente y, al mismo tiempo, aumenta la velocidad de alisamiento.

- *Dificultades en el proceso de electropulido*

En el electropulido del acero pueden aparecer defectos de acabado Kruglova E. G.²⁹, ha determinado las causas de algunos de los defectos y sugiere la forma de corregirlos.

En la siguiente Tabla 5 se mencionan los síntomas, causas y correcciones para el pulido electrolítico del acero para electrolitos que no pasan los 10 A x hora/litro y electrolitos que han pasado los 10 A x hora/litro.

Tabla 5. Causas, defectos y corrección del pulido electrolítico del acero ⁸

I. Para electrolitos que no pasan de los 10 A x hora/litro

Síntoma	Causa	Remedio
1. Picado.	Presencia en el electrolito de partículas muy finas de ácido crómico en suspensión.	Calentar el electrolito hasta 90-100 °C hasta disolver por completo el ácido. Si, antes de calentar, el peso específico del electrolito es mayor de 1.73 añadir agua (antes de calentar).
2. Aparecen trozos mates con tintes azulados.	a) El electrolito no se ha calentado y electrolizado. b) Temperatura del electrolito baja.	a) Calentar el electrolito durante 1 hora a 120 °C o electrolizarlo haciéndole pasar 5-10 A/L con una corriente de 40 A/dm ² . b) Calentar el electrolito a 70-80 °C.
3. Manchas pardo-opalescentes.	Peso específico del electrolito superior a 1.77.	Diluir el electrolito a densidad de 1.74 y calentar a 90-100 °C durante 1 hora.
4. Falta de brillo y manchas blanquecinas sobre fondos amarillos.	Concentración de Cr ₂ O ₃ alta (más de 1.5 %).	Oxidar el Cr ₂ O ₃ .
5. Falta de brillo y manchas amarillas.	Peso específico bajo. Densidad del electrolito inferior a 1.7	Calentar el electrolito hasta alcanzar una densidad de 1.74

II. Para electrolitos en los que han pasado más de 10 A x hora/litro

6. Rayas blancas	Densidad del electrolito demasiado alta (más de 1.82)	Diluir con agua hasta alcanzar el valor de 1.74 y calentar a 90-100 °C durante una hora.
7. Ausencia de brillo y manchas ligeramente amarillas.	Peso específico del electrolito demasiado bajo.	Calentar el electrolito hasta alcanzar un peso específico de 1.74.
8. Ausencia de brillo, manchas pardo-oscuro.	a) Concentración de Cr ₂ O ₃ demasiado alta. b) Temperatura del electrolito alta (más de 70 °C). c) Corriente anódica con densidad superior a 50 A/dm ² . d) Mal contacto entre pieza y suspensión.	a) Oxidar el Cr ₂ O ₃ b) Bajar la temperatura a 70 °C. c) Regular la densidad a 25-30 A/dm ² . d) Mejorar el contacto
9. En la vecindad del mecanismo que sostiene la pieza, aspecto poco lustroso con manchas pardas; la superficie permanece brillante.	Contacto eléctrico débil.	Aumentar la superficie de contacto; limpiar el sustentador.
10. Manchas blanco-plata en las partes profundas de las piezas y en el entorno		Cambiar la posición de las piezas, entrar los cátodos, con forma, dentro de las

del contacto con el mecanismo sustentador.	Las partes salientes que forman los huecos apantallan las zonas profundas.	profundidades. Aumentar la densidad de corriente hasta 50 A/dm ² .
11. Ondulaciones en los fillos y taladros.	<ul style="list-style-type: none"> a) Temperatura del electrolito alta. b) Tiempo de electropulido excesivo. c) Densidad de corriente anódica excesiva. 	<ul style="list-style-type: none"> a) Bajar la temperatura del electrolito a 70 °C. b) Acortar el tiempo de electropulido a 5-8 minutos. c) Bajar la densidad de corriente anódica a 25 A/dm².
12. Manchas parduscas que aparecen al sacar las piezas del baño.	Tiempo de tratamiento cortó.	Aumentar el tiempo a 8-10 minutos.
13. Tintado pardo-azulado de la superficie después de un tratamiento alcalino.	<ul style="list-style-type: none"> a) Excesiva concentración de hidróxido sódico (más de 10 %). b) Excesivo tiempo de tratamiento en solución alcalina (más de 30 minutos). 	<ul style="list-style-type: none"> a) Reducir la concentración del hidróxido al 10 %. b) Reducir el tiempo de tratamiento alcalino a 10 minutos.
14. Ralladuras y zonas alternadas de grano fino y basto de la estructura del metal.	Efecto de laminado y subsiguiente revenido.	Acortar el tiempo de pulido a 5 minutos.

5.2 Pulido electrolítico del cobre y sus aleaciones

Los electrolitos más extensamente utilizados para el electropulido del cobre y de sus aleaciones están basados en el ácido ortofosfórico ¹⁷.

Layner investigo el efecto de los distintos factores en el electropulido del cobre; afirma que existe una definida relación entre la concentración de ácido ortofosfórico y la densidad de corriente. Cuanto mayor es la concentración del ácido, más bajos son los valores de densidad de corriente límite (tramos horizontales) y menor es el valor de la densidad con que se puede electropulir. Cuando la concentración de ácido se reduce, los límites de potencial de ánodo entre los que se produce el tramo horizontal de curva (densidad de corriente constante) se acercan (el tramo horizontal es más corto).

Layner ²⁶ da los siguientes datos que relacionan el tiempo de electropulido y la concentración de ácido:

Peso específico del electrolito a 15 °C	Densidad de corriente inicial (A/dm ²)	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	10.5	4

Cuanto mayor son la temperatura y el removido del electrolito, mayor es la difusión de los productos anódicos y mayor es la densidad de corriente del tramo horizontal de curva. Con un electrolito de peso específico 1.09, sin remover el baño, el tramo horizontal se origina a los 12 A/dm² a 40 °C. Con el mismo electrolito y agitación enérgica del baño, con burbujas de aire, los tramos horizontales a 20

°C y 30 °C se producen con 19.5 y 27 A/dm² respectivamente. A 40 °C la zona de densidad de corriente constante se produce a 90 A/dm².

A continuación se da la composición de algunos electrolitos (Tabla 6), así como sus condiciones de trabajo para el cobre y sus aleaciones.

Tabla 6. Composición del electrolito y condiciones de trabajo para el electropulido del cobre y sus aleaciones ⁸

Electrolito	Densidad de corriente anódica (A/dm ²)	Temperatura (°C)	Tiempo de pulido (min.)	Material
Ácido ortofosfórico densidad 1.3-1.4	4-8	12-25	2-8	Cobre
Ácido ortofosfórico densidad 1.6	5-20	15-25	2-5	Cobre y latón
ácido ortofosfórico densidad 1.5	10-15	20-25	3-5	Bronce
Ácido ortofosfórico 74 % ácido crómico 6 % agua 20 %	30-50	20-30	0.5-2	Cobre y latón
Ácido ortofosfórico 80-88 %, ácido crómico 12 %, agua-más de 8 %	20-25	75-80	30-60	Cobre, latón y bronce

La acumulación de iones de cobre en el baño tiene un efecto favorable para el pulido. La Tabla 7 da los resultados de la concentración de cobre sobre el tiempo de pulido.

Tabla 7. Influencia del contenido de cobre y tiempo de electropulido ⁸

Contenido de H ₃ PO ₄ 1 kg/L y corriente inicial de 1.8 A/dm ²		Contenido H ₃ PO ₄ de 3 kg/L y corriente inicial de 75 A/dm ²	
Cobre en el electrolito (g/L)	Tiempo de pulido (min.)	Cobre contenido en el electrolito (g/L)	Tiempo de pulido (min.)
5	13	5	6
10	12	10	5
40	10	20	4

El trabajo normal del electrolito puede iniciarse cuando contiene 3-4 g/L de cobre. Las soluciones nuevas de ácido ortofosfórico pueden electrolizarse utilizando ánodos de cobre y densidades de corriente de 0.5-1 A/dm² hasta un paso total de 5 A x hora/L de coulombios. El electrolito más adecuado contiene 716 g/L de H₃PO₄ (peso específico 1.55).

Con un electrolito de este tipo, el electropulido se produce en las condiciones que corresponden al tramo de curva horizontal. Como el mejor electropulido se obtiene a una muy determinada densidad de corriente, Layner recomienda que se controle el proceso a través del voltaje.

Las aleaciones de cobre con una sola fase sólida, latón alfa, se pulen mejor que las de dos o más fases. El lustre del latón pulido después de un revenido, es mejor que el obtenido después de un laminado.

La solución de ácido fosfórico se corrige periódicamente añadiendo ácido y agua. La densidad del baño se mide diariamente. Para evitar un sobrecalentamiento de la solución que originaría defectos, la corriente del baño se mantiene entre 0.3 y 0.5 A x hora/L, los cátodos son de plancha de cobre. La relación de superficies de ánodo y cátodo se mantienen de 1:3 a 1:5. Sobre el cobre catódico se forma una superficie esponjosa. Para evitar la contaminación del baño, el cátodo se protege con una bolsa resistente al baño. Antes de iniciarse el proceso, los cátodos se limpian con cepillos de acero.

Para mejorar la resistencia a la corrosión después del electropulido se sumergen las piezas durante un minuto en una solución de bicromato potásico.

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 fosfórico solo se obtienen buenos resultados trabajando en las condiciones que representan el tramo horizontal de la curva de potencial anódico, si el electrolito contienen 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.

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

Ácido ortofosfórico	74
Ácido crómico	6
Agua	20

La Tabla 8 describe las particularidades de los principales tipos de defectos, sus causas y forma de corregirlos.

Tabla 8. Defectos en el electropulido del cobre con soluciones de H₃PO₄ y CrO₃⁸

Síntoma	Causa	Remedio
Superficie mate	Excesiva concentración de cromo trivalente (más de 1.5 %).	Someter el baño a la oxidación del cromo.
Pulido no uniforme	<ol style="list-style-type: none"> Mal contacto entre piezas y bastidor. Apantallado de unas piezas sobre otras. 	<ol style="list-style-type: none"> Mejorar el contacto eléctrico. Alterar las posiciones.
Picado de las superficies antes de usar la solución para más de 30 A x hora/L	<ol style="list-style-type: none"> Temperatura de la solución demasiado baja. Densidad de corriente anódica demasiado baja. La solución no ha sido electrolizada. 	<ol style="list-style-type: none"> Aumentar la temperatura de la solución a 35-40 °C. Aumentar la corriente anódica a 40-50 A/dm². Electrolizar con un ánodo de cobre y 5 A x hora/L.

Picaduras en las distintas partes de la superficie	<ol style="list-style-type: none"> 1. La solución contiene demasiada agua (peso específico menor de 1.6). 2. Densidad de corriente anódica demasiado baja. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Calentar la solución a 120 °C hasta que la densidad sea 1.6-1.62. 2. Aumentar la densidad a 40-50 A/dm².
--	--	---

5.3 Pulido electrolítico de níquel

El pulido electrolítico del níquel no se ha desarrollado convenientemente, ya que existe mucha facilidad de obtener un depósito brillante de níquel proveniente de un baño electrolítico, sin embargo, podría llegar a tener algún tipo de aplicación industrial para el abrillantado de películas de depósitos de níquel semimate. Se han empleado muchos electrolitos para pulir el níquel. El principal constituyente es el ácido sulfúrico ^{17, 25}.

Los valores máximo y mínimo de densidades de corriente que pueden emplearse para un acabado brillante dependen mucho de la concentración de ácido y de la temperatura de la solución. Según Layner I. V. ²⁷, con soluciones de densidad inferior a 1.3 (510 g de ácido sulfúrico por litro) y superior a 1.66 (1200 g/L de ácido sulfúrico) a 40 °C es imposible obtener una superficie brillante con densidades de corriente de 20 a 200 A/dm². Para soluciones de densidad 1.66, la densidad de corriente mínima es de 25 A/dm². Con una densidad de 30 A/dm² la capa anódica de electrolito se satura pronto de sulfato de níquel, que se deposita sobre el ánodo. La densidad de corriente baja y ataca la superficie del metal. El mismo fenómeno se observa con soluciones de densidad 1.64, 1.62 y 1.60 con mayores densidades de corriente. Con soluciones más diluidas (1.3-1.6), no se observa el mecanismo de pasivación. Cuanto más baja es la concentración de ácido sulfúrico, más alta es la densidad de corriente mínima que se puede emplear.

A continuación se da la composición de electrolitos, densidad de corriente, temperatura y tiempo para el electropulido del níquel (Tabla 9).

Tabla 9. Composición del electrolito y condiciones de trabajo para electropulir níquel ⁸

Electrolito	Densidad de corriente anódica (A/dm ²)	Temperatura (°C)	Tiempo de pulido (min.)
Ácido sulfúrico 1.100 g/L	30-40	20-40	0.5-2
Ácido sulfúrico 1.200 g/L Ácido ortofosfórico 90 g/L	30-40	40-50	2-3
Ácido sulfúrico 1.200 g/L Ácido crómico 40 g/L Peróxido de hidrogeno (30%) 75 g/L	30-35	20-25	0.5-1
Ácido sulfúrico 900 g/L Ácido ortofosfórico 750 g/L Ácido cítrico 20 g/L	35-50	27	0.2-1
Ácido sulfúrico 1.100 g/L Ácido crómico 40 g/L Glicerina 40 g/L	30-40	35-35	0.3-0.75

Los defectos más corrientes en el electropulido, de recubrimientos de níquel, con electrolito a base de ácido sulfúrico son la desaparición del recubrimiento de ciertas regiones que dejan el metal base al descubierto y el picado del recubrimiento. El primer defecto es debido al mayor poder de penetración del electropulido que el del baño de recubrimiento. Con un tiempo de electropulido tan corto, cualquier dilatación del tratamiento puede originar una gran eliminación de metal. El picado puede ser debido a la presencia de inclusiones extrañas en el recubrimiento, a una baja densidad de corriente en el electropulido o a la presencia de iones del oro en el baño.

La siguiente Tabla 10 enumera los defectos más usuales, indicando las causas y forma de corregir dichos defectos.

Tabla 10. Defectos durante el electropulido de recubrimientos con níquel ⁸

Síntoma	Causa	Remedio
La mayor parte de la superficie resulta mate	a) El contenido de agua del electrolito es alto (densidad 1.64). b) Densidad de corriente anódica demasiado baja.	a) Calentar el electrolito a 80-90 °C hasta alcanzar una densidad de 1.65. b) Regular la densidad de corriente a 40-50 A/dm ² .
Picado	a) La concentración de H ₃ PO ₄ es baja. b) La concentración de ácido cítrico es baja.	a) Analizar químicamente la solución y añadir el ácido fosfórico necesario. Si el contenido de H ₃ PO ₄ es adecuado añadir 1 g/L de ácido cítrico.
Acabado mate y manchas verdes	La solución no ha sido electrolizada después de su preparación.	Electrolizar la solución con ánodos de níquel hasta pasar 8-10 A x hora/L con una densidad de corriente de 30 A/dm ² .
Disolución rápida del níquel	Temperatura de la solución demasiado alta	Bajar la temperatura a 20-25 °C.

- La palabra electrolizar proviene de electrolisis que es el proceso que separa los elementos de un compuesto por medio de electricidad.

Para ciertos casos, las electrodeposiciones de níquel se pulen con soluciones que contienen iones de cromo. La solución siguiente se utiliza para pulir superficies niqueladas de piezas de motor, motos y bicicletas.

Ácido sulfúrico	1750 g/L
Ácido crómico	30 g/L
Glicerina	15 g/L
Agua	hasta 1 litro
Densidad	1.60-1.61

La siguiente Tabla 11 enumera los principales tipos de defectos que pueden presentarse al pulir el níquel con soluciones que contienen ácido sulfúrico, glicerina y cromo ionizado.

Tabla 11. Defectos en el electropulido del níquel con soluciones conteniendo ácido sulfúrico, glicerina e iones de cromo ⁸

Síntoma	Causa	Remedio
Pulido pobre	<ul style="list-style-type: none"> a) Densidad de corriente demasiado baja. b) Densidad del electrolito alta. c) Baño mal electrolizado. 	<ul style="list-style-type: none"> a) Aumentar la densidad de corriente anódica a 30 A/dm². b) Diluir con agua hasta una densidad de 1.6 c) Electrolizar hasta que el baño contenga 5 g/L de níquel.
Grandes pérdidas de níquel con gran lustre de la superficie	<ul style="list-style-type: none"> a) Tiempo de pulido muy grande. b) Temperatura de la solución muy alta. c) Densidad de la solución baja. 	<ul style="list-style-type: none"> a) Acortar el tiempo a 20-30 segundos. b) Enfriar a 20 °C. c) Calentar hasta conseguir una densidad de 1.62-1.65.
El níquel no se pule	Temperatura de la solución alta.	Enfriar hasta 20 °.
Se forma mucha espuma en la superficie del baño	La solución está contaminada por sustancias orgánicas.	Electrolizar la solución con ánodo de plomo.

La Figura 16 muestra como son los tanques de baños de níquel.



Figura 16. Tanque de baños de Níquel ²⁰

5.4 Pulido electrolítico aluminio

Las soluciones para el electropulido del aluminio pueden dividirse en dos grupos. Las soluciones del primer grupo contienen fosfatos, álcalis y ácido fluobórico. Se caracterizan por la baja velocidad de disolución del metal y se usan para acabar pulidos mecánicos de piezas que han de tener un elevado coeficiente de reflexión. Se emplean para el acabado de reflectores que requieren un coeficiente de reflexión que no puede obtenerse mediante pulidos mecánicos. Las soluciones que contienen ácidos fluobórico y fosfórico solo son adecuadas para pulir aluminio de gran pureza.

El segundo grupo incluye soluciones que contienen ácido fosfórico, ácido sulfúrico y ácido crómico. Se caracterizan por la mayor velocidad de disolución del metal que las del primer grupo y pueden alisar microasperezas consiguiendo acabados relativamente brillantes, pero sin pasar de cierto límite. Estas soluciones se emplean para efectuar pulidos que sustituyen a los mecánicos de piezas de aluminio de distintos grados de pureza y de sus aleaciones.

En la Tabla 12 se da la composición de los electrolitos usados para el electropulido del aluminio y las condiciones de trabajo.

Tabla 12. Composición del electrolito y condiciones de trabajo para el electropulido del aluminio ⁸

Solución (% en peso)	Densidad de corriente anódica (A/dm²)	Voltaje (V)	Temperatura (°C)	Tiempo de tratamiento (min.)
Ácido ortofosfórico 65 Ácido sulfúrico 15 Ácido crómico 6 Agua 14	20-25	12-15	70-80	2-5
Ácido ortofosfórico 43 Ácido sulfúrico 43 Ácido crómico 3 Agua 11	30-50	12-15	70-80	2-5
Ácido ortofosfórico 36 Ácido sulfúrico 36 Ácido crómico 4 Agua 24	20-40	12-15	70-90	1-5
Ácido ortofosfórico 82 Ácido crómico 12 Agua 6	20-40	12-15	70-80	1-3
Fosfato trisódico 5 Sosa (calcinada) 15	3-6	12-15	80-90	5-8
Ácido hidrofluobórico 1.25	1.5-3	20-30	30	10-20

Además de las soluciones de la Tabla 12 también se han recomendado otras que contienen ácido perclórico y anhídrido acético. El uso de estas soluciones exige tomar precauciones contra el riesgo de explosión.

La pureza del aluminio es un factor importante en el electropulido del metal. Se puede conseguir un buen coeficiente de reflexión solo en el caso de aluminio puro; el pulido del metal aleado es posible por la desigual disolución de la superficie del ánodo. Este factor dificulta el electropulido de las aleaciones, en especial las que contienen silicio. Para las aleaciones aluminio silicio, en la literatura técnica sobre el tema se mencionan soluciones que contienen ácido hidrofluorhídrico.

Para el tratamiento de fundiciones de aluminio que contengan 5 % de silicio, se recomienda un electrolito que contenga 13 % de ácido hidrofluorhídrico y 52 % de glicerina. Las condiciones de trabajo son: densidad de corriente 20 A/dm², temperatura de 25 °C y tiempo de tratamiento 10 minutos. Durante el electropulido, la solución debe agitarse. Las posibilidades prácticas del pulido de las aleaciones de aluminio silicio necesitan todavía muchas horas de investigación.

La siguiente Tabla 13 enumera los principales tipos de defectos que pueden presentarse al electropulir el aluminio con soluciones de ácido fosfórico, sulfúrico y crómico, así como la causa que lo origina y su posible solución.

Tabla 13. Defectos en el electropulido del aluminio con soluciones de ácidos fosfórico, sulfúrico y crómico ⁸

Síntoma	Causa	Remedio
Picado de la superficie	<ol style="list-style-type: none"> 1. Pequeñas partículas de CrO₃ en suspensión en el baño. 2. Falso contacto entre piezas y bastidor. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Calentar el baño hasta la completa disolución del CrO₃. 2. Mejorar el contacto.
Rayas blancas mate y manchas sobre el metal	<ol style="list-style-type: none"> 1. Densidad del electrolito demasiado alta. 2. Concentración del sulfúrico baja. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Diluir el electrolito a una densidad de 1.65 y calentar durante 2 o 3 horas a 80-90 °C. 2. Añadir el ácido sulfúrico que indique el análisis químico.
Ausencia de lustre	<ol style="list-style-type: none"> 1. Densidad del electrolito baja. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Calentar el electrolito hasta alcanzar una densidad de 1.65-1.67
Se observan manchas mate	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sobrecalentamiento local del electrolito. 2. Falso contacto entre piezas y bastidor. 3. Densidad de corriente alta. 4. Concentración de CrO₃ alta. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Bajar la temperatura del electrolito a 70-80 °C. 2. Mejorar el contacto. 3. Bajar dicha densidad a 20-30 A/dm². 4. Oxidar el cromo trivalente.

5.5 Pulido electrolítico de plata

El primer método de electropulido fue sugerido por Shpitalskiy E. I. y su patente es todavía de cierto valor práctico. El electrolito podía usarse para el electropulido y la electrodeposición. Difiere del electrolito comúnmente utilizando sólo en la concentración de cianuro.

El electropulido de la plata tiene muchas ventajas ²⁵. Las superficies que se electropulen en general son las plateadas. En este caso no se necesita ninguna preparación preliminar de la superficie si se electropule después de platear. Comparado con el pulido mecánico, el electrolito tiene menos pérdidas de metal. Si además, la electrodeposición y el electropulido se pueden efectuar con el mismo baño, las pérdidas son aun menores. En este caso se ahorran operaciones como las de colgar las piezas en el bastidor, descolgarlas, desengrases y lavados que simplifican el proceso.

El electrolito recomendado por Shpitalskiy E. I. tiene la composición siguiente:

Cianuro de plata	20 g/L
Cianuro potásico (libre)	30 g/L

Las condiciones de trabajo son: densidad de corriente anódica 10-12 A/dm², temperatura de la solución 20-25 °C, voltaje del baño 1.2-1.3 V y tiempo de tratamiento 2-3 minutos. Como cátodos se usan planchas de plata. La solución se prepara disolviendo 25 g de nitrato de plata en agua y añadiendo a la solución 100 ml de cianuro potásico al 10 %. El precipitado de cianuro de plata que se obtiene se lava con agua hasta que no se produzca reacción por la presencia de iones NO₃. Después, el

precipitado se disuelve en 300 ml de solución de cianuro potásico al 10 % y se añade agua hasta un litro. Cuando se utiliza la solución para platear, se obtiene una superficie fina utilizando densidades de corriente catódica de 0.1-0.2 A/dm².

Layner ha sugerido un electrolito para el pulido con la siguiente composición: ²⁶

Cianuro de plata	35 g/L
Cianuro potásico (libre)	38 g/L
Potasa	37 g/L

El electropulido de la plata va acompañado por el fenómeno de la pasivación anódica que se refleja en variaciones de la intensidad de la corriente y voltaje, incluso pueden observarse a simple vista las variaciones de apariencia de la superficie del ánodo. A densidades de corriente bajas, el ánodo de plata se disuelve formando iones complejos al igual que en el plateado. Si la densidad de corriente aumenta, la concentración de iones cianuro en la carga anódica de electrolito que envuelve el ánodo, disminuye y la concentración de iones de plata aumenta. Cuando la concentración de los productos formados por la disolución del ánodo alcanza un valor máximo sobre la superficie del metal, comienza a depositarse sobre el ánodo una película de cianuro de plata.

La densidad de corriente para electropulir depende de la temperatura, composición del electrolito y de la agitación del baño. A mayor concentración de cianuro potásico libre, mayor temperatura o mayor agitación, mayor es la densidad de corriente que produce la pasivación del ánodo.

Con una solución de plateado o con una solución que contiene un 2-3 % de cianuro potásico se puede electropulir utilizando corriente continua intermitente con periodos de 1 o 2 segundos y un tiempo total de tratamiento de 2-3 minutos. Usando dicha corriente intermitente no se requiere una agitación tan fuerte, puesto que en los tiempos de corriente nula se disuelve la película pasiva sobre el metal. Se han obtenido buenos electropulidos moviendo los bastidores que sostienen las piezas a tratar con mecanismos adecuados.

5.6 Pulido electrolítico de zinc, estaño, plomo, cobalto, oro, titanio y cromo

- *Oro y sus aleaciones*

El pulido electrolítico del oro y sus aleaciones, ha resultado de suma utilidad, principalmente para el rubro de joyería. Resulta inevitable su utilización cuando se desea pulir piezas muy delicadas, o con filigranas, o con interiores, en donde es imposible recurrir al pulido mecánico ^{25,30}.

La mayoría de las soluciones del electropulido son tóxicas, por lo cual deben ser ubicadas en lugares bien ventilados, o con sistema de aspiración forzada.

- *Electrolito universal*

Normalmente, el electropulido de un metal requiere su propio electrolito, lo que representa dificultades de productividad. Recientemente se ha intentado encontrar electrolitos para electropulir diferentes metales.

La composición de uno de estos electrolitos es:

Ácido ortofosfórico	328 g/L
Ácido crómico	372 g/L
Ácido sulfúrico	25 g/L
Ácido bórico	8.3 g/L
Ácido fluorhídrico	33 g/L

Ácido cítrico	12 g/L
Anhidrido ftálico	4.3 g/L

La solución se emplea a 94 °C, la densidad de corriente anódica y el tiempo de pulido se selecciona para cada metal en particular:

Acero	17-40 A/dm ²	2-4 min
Metales ferrosos	10-15 A/dm ²	3-3.5 min
Aleaciones ligeras	12-39 A/dm ²	2 min
Bronce	18-24 A/dm ²	2-2.3 min
Cobre	5-13 A/dm ²	1.5 min
Plomo	29-70 A/dm ²	6 min
Zinc	20-24 A/dm ²	2-2.5 min
Estaño	7-9 A/dm ²	1,5-3 min

Los cátodos para el electropulido con dicho electrolito son de cobre o de acero inoxidable. Este electrolito requiere todavía una experiencia y confirmación industrial práctica.

La siguiente Tabla 14 da la composición de electrolitos y sus condiciones de trabajo para el electropulido del zinc, estaño, plomo, cobalto, oro, titanio y cromo.

Tabla 14. Composición del electrolito y sus condiciones de trabajo para el electropulido del zinc, estaño, plomo, cobalto, oro, titanio y cromo ⁸

Metal	Electrolito	Densidad de corriente anódica (A/dm ²)	Temperatura (°C)	Tiempo de tratamiento (min.)
Zinc y estaño	Hidróxido potásico 25 %	16	ambiente	10-15
zinc	Ácido crómico 17 % Agua 83 %	1.8		
zinc	Ácido crómico 7 % Dicromato potásico 29 % Ácido sulfúrico 6 % Agua 58 %	0.2		
Zinc	Ácido sulfúrico 150 g/L Ácido crómico 4 g/L Cianuro potásico 5 %	40	Menos de 25°C	1-2
Zinc y cadmio	Cianuro potásico 5 %	16	ambiente	
plomo	Ácido perclórico 18.5-33 % Ácido acético 63-76.5 % Agua 2-9 %	0.003-0.006	20-39	5-10
plomo	Ácido perclórico 30-34 % Ácido acético glacial 66-70 %	0.1-0.2	20-39	5
Plomo y tungsteno	Hidróxido sódico 10%	3-6	ambiente	8-10
Cobalto *	Ácido ortofosfórico (peso específico 1.35)			
Tungsteno	Ortofosfato monosódico 160 g Agua 1 l	0.07	38-49	10
Oro **	Cianuro potásico 40 g/L Ferrocianuro potásico 10 g/L Sosa (calcínada) 20 g/L Hidróxido sódico 5 g/L			

Oro	Tiourea 25 g/L Ácido sulfúrico 5.5 g/L Ácido tartárico 10 g/L	1.5-3.5	20-45	5
Titanio	Anhídrido acético 795 ml Ácido perclórico (densidad 1.59) 185 ml Agua 48 ml	20-30		0.5-1
Cromo	Ácido sulfúrico 60 % Ácido ortofosfórico 20 % Ácido cítrico 10 % Agua 10 %	20-30	ambiente	5-10

*Las condiciones del electropulido se controlan suministrando una tensión constante de 1.2 V.

** Las condiciones del electropulido se controlan suministrando una tensión de 15-20 V.

La Figura 17 nos muestra como es un tanque de baño de cromo en la galvanoplastia.



Figura 17. Tanque de baño de Cromo ²⁰

CAPÍTULO VI

Desengrase electrolítico

En el presente capítulo se abordarán los conceptos básicos sobre el desengrase electrolítico y tipos, también se verá el tema desengrase anódico y catódico, así como las soluciones que se utilizan para el desengrase. ¹⁶

6.1 Conceptos generales

- *Desengrasado*

Esta operación consiste en eliminar ciertas películas de grasas, aceites, partículas de la superficie que se desea recubrir.

Las grasas que se adhieren a los metales pueden dividirse de la siguiente manera:

- a) Minerales, insolubles en agua y álcalis, insaponificables en álcalis, poco solubles en disolventes orgánicos; pueden emulsionarse o dispersarse en álcalis.
- b) Animales y vegetales, saponificables y emulsionables con álcalis, solubles en disolventes orgánicos.
- c) Derivados de grasas animales y vegetales, como jabones (solo en parte soluble en agua, aceites sulfurados, ácidos grasos libres, resinas, etc.), saponificables en parte pero emulsionables totalmente, en álcalis; solubles en disolventes orgánicos.

Debido a lo anterior, existen los siguientes tipos de limpieza de acuerdo a la clase de grasa adherida en el material:

- a) Limpieza con álcalis por inmersión o rociado.
- b) Desengrasado electrolítico con álcalis.
- c) Desengrasado con disolventes orgánicos.

- *Desengrasado con álcalis.*

Consiste en la eliminación de grasas de la superficie del material por medio de una emulsificación con disoluciones acuosas de álcalis fuertes como potasa cáustica, sosa cáustica, carbonato sódico, potásico, fosfato trisódico, ortosilicatos y metasilicatos alcalinos, vidrio soluble, bicarbonato sódico, carbonato amónico, entre otros.

- *Desengrasado electrolítico*

Es el procedimiento más efectivo de desengrase. En él, las piezas son desengrasadas en un electrólito alcalino con la cooperación de la corriente eléctrica, ejerciendo, la mayor parte de las veces, la función de cátodo y rara vez la de ánodo. El polo contrario lo forman los recipientes de hierro del baño o placas de hierro o cobre que se introducen en él. Sin embargo, para la revisión y limpieza de los electrodos es conveniente que éstos puedan extraerse del baño y no estén constituidos por el mismo recipiente.

Los principales componentes para el desengrasado electrolítico son: sosa cáustica, lejía potásica, carbonato sódico, carbonato potásico, fosfatos alcalinos, entre otros. Un baño de limpieza utilizado está formado por los siguientes elementos: 30 g/L de NaOH, 50 g/L de NaCN, 30 g/L de Na₂CO₃. Este baño trabaja a la temperatura ambiente con 6-8 V y una densidad de corriente de 50 A/dm² aproximadamente. El tiempo de desengrasado es sólo de 0.5 a 2 minutos.

Las sustancias para limpieza catódica funcionan con concentraciones de 3-5 % y temperaturas de 80-90 °C, y las anódicas son 6-10 % y 80-90 °C. El desengrase de cobre, latón, fundición de zinc y aleaciones de cobre se lleva a cabo con concentraciones de 3-5% y 70-95 °C en el procedimiento catódico y con 3-6 % y 70-95 °C en el anódico. Los trabajos con baño de desengrase electrolítico no deben realizarse en frío, porque la grasa y la cera se funden con el calor, facilitando de este modo su eliminación mucho mejor que en frío.

Los depósitos para desengrase electrolítico son de acero fundido soldado y van provistos de serpentín de calefacción en las paredes del recipiente y un rebosadero para la espuma. Los objetos se cuelgan de unos ganchos en forma de V invertida que penden de una barra redonda de latón colocada en el centro, separada del depósito por aisladores.

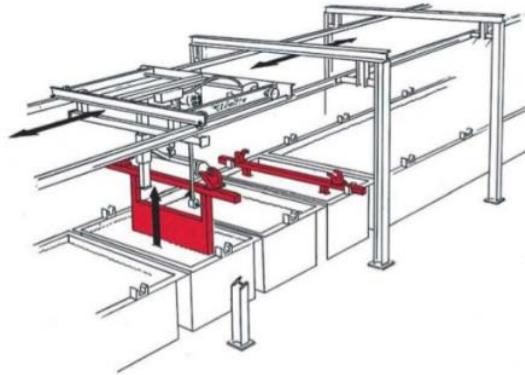


Figura 18. Instalación para un proceso de desengrase en línea recta ¹

- *Desengrasado con disolventes orgánicos*

El desengrasado con disolventes orgánicos consiste, por una parte, en disolver y, por otra, en debilitar o adelgazar las grasas; es decir, reducir su viscosidad para que haciéndose fluidas, puedan separarse de las piezas.

En esta forma de desengrasado, se utilizan hidrocarburos clorados no inflamables como tricloretileno, percloroetileno y tetracloruro de carbono. Estos desengrasantes orgánicos tienen la ventaja de disolver igualmente bien todas las grasas y aceites presentes en los materiales, sin atacarlos ni alterando su color, quedando los objetos secos y desengrasados. Además por destilación pueden recuperarse de nuevo.

- *Desengrase químico*

En este caso, se procede a la inmersión de la superficie a tratar en una solución química, durante un tiempo prefijado, empleando disolventes, detergentes o por electrólisis. En el desengrasado con disolventes, éstos son utilizados tanto en fase vapor como en frío. Eliminan las grasas, las pinturas y los barnices. En fase vapor, se utilizan normalmente disolventes cloratos, los cuáles se evaporan en el baño para producir los vapores disolventes.

A continuación, se citarán los disolventes más utilizados actualmente para el desengrase:

- Tricloroetano, tricloroetileno y percloroetileno
- Cloruro de metileno
- Triclorofluoretano
- Cloroformo

En el caso de la utilización del desengrase con disolventes en frío, se utilizan los mismos compuestos, pero se aplican por inmersión.

En el desengrase químico con detergentes (comerciales), se consigue eliminar cualquier tipo de grasa gracias a la presencia de elementos tensoactivos que disminuyen la tensión superficial del baño y que se añaden a una solución alcalina.

- *Desengrase por ultrasonidos*

Este sistema consiste en un medio químico, el cual se añade un mecanismo generador de ultrasonidos que crea un efecto de impacto sobre la superficie de la pieza y colabora en su limpieza mecánica.

El desengrase por ultrasonido tiene como función básica eliminar restos de grasitud de la superficie (restos de pasta de pulido, aceites de mecanizado, etc.), y prepararla para que toda película metálica a depositarse con posterioridad tenga adherencia suficiente, por lo cual se sobrentiende la importancia de este paso por ser el inicial.

Cualquier inconveniente que surja por falta de adherencia dependerá evidentemente de estos pasos de inicio. Se recomienda no tocar con las manos las piezas una vez desengrasadas, y ya amarradas o colgadas con alambre realizar los pasos subsiguientes colgando del mismo.

- *Desengrase alcalino por ultrasonidos*

Se trata de un baño de pretratamiento que tiene por finalidad eliminar la mayor parte de restos de aceites, grasas y pastas de pulir que puedan llevar las piezas a tratar en su superficie. El medio es alcalino con la siguiente formulación:

Sosa cáustica:	40 g/L
Carbonato sódico:	25 g/L
Fosfato trisódico 12·H ₂ O:	10 g/L
Metasilicato sódico 5·H ₂ O:	10 g/L
Humectantes:	5 g/L

En este medio, las condiciones de trabajo son las siguientes:

pH	12-14
Temperatura:	80 °C

Un mecanismo generador de ultrasonidos crea un efecto de impacto sobre la superficie de la pieza colaborando a la limpieza mecánica de la misma.

6.2 Desengrase electrolítico anódico

En el desengrase electrolítico anódico las piezas son utilizadas como ánodos en una solución electrolítica alcalina para fines de limpieza utilizando un voltaje bajo (3-12 V) de corriente directa. Las densidades de corriente varían de 1 a 16 A/dm² dependiendo del metal que va a ser limpiado y del tiempo de limpieza aplicado. Los tiempos de limpieza de ½ a 2 minutos generalmente son suficientes para la mayoría de las aplicaciones. El uso de altas densidades de corriente es posible cuando los tiempos de limpieza son más cortos.

El desengrase electrolítico anódico es deseable para el paso de limpieza final siempre y cuando sea posible, debido al hecho de que el metal se está disolviendo al momento que está siendo limpiado.

Esta acción de disolución remueve las manchas metálicas y previene la deposición de capas metálicas no adherentes. El oxígeno generado en la superficie crea una acción limpiadora que ayuda a la remoción de la suciedad. Del mismo modo, la limpieza anódica se utiliza para evitar la oclusión de hidrogeno que fragiliza la pieza.

Es importante el control de la densidad de corriente, la temperatura y la concentración, particularmente en los metales no ferrosos, para evitar el ataque anódico y la subsecuente pérdida de brillo en la pieza. Se deben de evitar los tiempos prolongados de limpieza con corriente inversa, altas densidades de corriente, altas temperaturas y baja concentración de sales en la solución electrolítica limpiadora, principalmente en las piezas de latón y demás aleaciones en base zinc para prevenir el ataque masivo de las mismas.

El desengrase electrolítico anódico por su carácter alcalino no es recomendado para aluminio, cromo, estaño, plomo y otros metales los cuales son solubles en soluciones alcalinas. El desengrase anódico utiliza tiempos muy cortos a bajas densidades de corriente y algunas veces se utiliza para activar plomo y aleaciones de plomo antes del proceso de electrodeposición.

6.3 Desengrase electrolítico catódico

En el desengrase electrolítico catódico las piezas son utilizadas como cátodos y se utiliza generalmente el mismo equipo, voltaje y densidades de corriente como se describen para el desengrase anódico. En este proceso el hidrógeno es liberado en la superficie de la pieza. La cantidad de hidrógeno liberado en el cátodo es el doble que la del oxígeno liberado en el ánodo para una densidad de corriente dada. Por lo tanto, la remoción de suciedad por la liberación de gas se lleva a cabo en mayor cantidad en el cátodo que en el ánodo. Por esta razón la limpieza electrolítica catódica es algunas veces utilizada como un proceso previo seguido de la limpieza electrolítica anódica.

En este proceso algunos materiales cargados positivamente son atraídos hacia la pieza y pueden ser reducidos y depositados sobre la superficie. Algunas películas (metálicas) depositadas son habitualmente adherentes pero difíciles de detectar y remover. Tales películas pueden causar pobre adhesión, rugosidad y/o manchas de los metales electrodepositados.

Algunas piezas susceptibles a la fragilización por la oclusión de hidrógeno no deben ser limpiadas catódicamente a menos que se tomen los pasos adecuados después del proceso para remover el hidrogeno. Generalmente, el tratamiento térmico durante una hora a 200 °C inmediatamente después de haber aplicado el proceso de limpieza catódico removerá el efecto de fragilización por hidrógeno.

La limpieza catódica es susceptible a las machas por contaminación de cromo que la limpieza con corriente inversa. La limpieza electrolítica catódica es usada para las siguientes aplicaciones:

- Para limpiar metales tales como el cromo, estaño, plomo, latón, magnesio y aluminio que son disueltos o atacados si se aplicara limpieza del tipo anódico.
- Para limpiar las superficies de níquel pulidas antes del proceso de cromado. La limpieza anódica produciría una película pasiva sobre el níquel debido a la oxidación, que impediría la deposición del cromo brillante.

6.4 Baños utilizados en el desengrase electrolítico

Normalmente es necesario realizar un tratamiento de desengrasado para eliminar los residuos de aceites y grasas de las superficies de la pieza. Para ello se introducen las piezas en baños desengrasantes que contienen agentes tensoactivos cuya eficacia depende de la concentración del desengrasante, la temperatura del baño y la duración del tratamiento.

Un buen desengrasado evita el arrastre de aceites y grasas a las fases de tratamiento posteriores, facilitando además la valorización de los residuos y subproductos obtenidos.

La efectividad en la limpieza y el desengrase de metales es vital para todas las industrias en las que el proceso de producción incluye la fabricación o el montaje de piezas metálicas principalmente, las industrias de automoción, aviación, electrodomésticos y metalmecánica.

La siguiente Tabla 15 indica algunas fórmulas clásicas de desengrase electrolítico, cuya duración operatoria excede raramente los 3 minutos, generalmente 1 a 2 minutos.

Tabla 15. Fórmulas clásicas de desengrase electrolítico ¹

Aplicación de los electrolitos observaciones	Composición química en g/L							Temp. °C	Condiciones electrolíticas de trabajo	
	Cianuro sódico NaCN	Cianuro de cobre CuCN	Sosa caustica NaOH	Carbonato sódico Na ₂ CO ₃	Fosfato sódico Na ₃ PO ₄ 12 H ₂ O	Agente húmedo	E.D.T.A Acido ⁽¹⁾		Tensión en voltios V	Densidad catódica A/dm ²
Desengrase simple para aleaciones ferrosas..... De cobre.....	40 40		40 a 60 40	20		0.75 eventual-mente	1 a 2 eventual-mente	≤ 22	7 min 9 máx.	12 aprox.
Desengrase simple para aleaciones de zinc	40		20	60		Eventual-mente	1 a 2 eventual-mente	≤ 25	7-9	12 aprox.
Desengrase con cobreado para todos los metales	10 a 40	4 a 20	50-100			Eventual-mente	nada	≤ 22	7-8	12 aprox.
Desengrase simple para el aluminio				60 12.5 50	25	Eventual-mente 1.5	1 a 2 10 ⁽²⁾	80-90 55-60	6-7 6-7 7 a 10	10-12 10-12 4-8

⁽¹⁾ El EDTA es un complejante muy activo y barato, 1 g de EDTA ácido es capaz de acomplejar: 90 mg de aluminio, 187 mg de hierro, 211 mg de cobre, 134 mg de calcio, 218 mg de zinc. EDTA = ácido etilendiaminotetracético.

⁽²⁾ Se trata de la sal tetrasódica del EDTA

CAPÍTULO VII

Etapas del proceso de desengrase electrolítico

En este capítulo se describirá las etapas en las que consiste el desengrasado electrolítico que son: los tratamientos previos, tratamientos posteriores así como el equipo a utilizar y sus aplicaciones del desengrase.

7.1 Tratamientos previos al desengrase electrolítico

La eficiencia de los procesos de desengrase depende la adherencia del depósito metálico. La eliminación de todo rastro de grasa es vital si los artículos están destinados a recibir un depósito electrolítico.

La eliminación defectuosa de la grasa superficial del artículo a procesar, conduce a la formación de ampollas y/o depósitos poco adherentes que se desprenden o pelan. El proceso de desengrase previo consiste en quitar la grasa y aceite, ya sea del estampado, trefilado, embutido o pulido de la superficie de la pieza.

Para un determinado número de tipos de tratamientos: pintura, tratamientos por inmersión en metal fundido, generalmente es suficiente un predesengrase. Para la electrodeposición, son indispensables los dos tipos de desengrase.

- Predesengrase con disolventes orgánicos

En el procedimiento del predesengrase con disolventes orgánicos físicamente se elimina todo vestigio de grasa pero no químicamente es decir que aparentemente la pieza quedará libre de grasa para realizar esto se utiliza sustancias inflamables tales como bencina, acetona, thinner, etc.

Se puede aplicar este tratamiento con sustancias líquidas o con sustancias de vapor, cuando se realiza con sustancias líquidas se aplica ya sea por el método de inmersión, pulverización o por brocha.

- Predesengrase por emulsión

Es aquel en el cual utiliza sustancias que contiene uno o más productos emulsificables o emulsionables. El objetivo principal de las emulsiones es tratar de disolver y emulsionar las grasas, es un procedimiento económico y barato. Por medio del predesengrase se elimina parte de la grasa.

La siguiente Tabla 16 indica los métodos que se utilizan para el predesengrase, así como los productos a utilizar y su método de aplicación.

Tabla 16. Métodos de predesengrase ¹⁶

MEDIO DE DESENGRASE	MÉTODO DE LA TÉCNICA DE DESENGRASE	PRODUCTOS UTILIZADOS	MÉTODO DE APLICACIÓN
Físico-químico	Con hidrocarburos	Benceno , White spirit, petróleo	Inmersión y frotado

	Con disolventes clorados	Tricloretileno Perclorotileno	1. Inmersión: en frío, en caliente 2. Al vapor 3. Mixta: inmersión en caliente al vapor
Químico	Disolventes emulsionables Emulsión Disolvente en dos fases Desengrase alcalino: sosa + sales alcalinas + surfactantes	A mezclar a los hidrocarburos Eliminación de grasas adherentes. Generalmente templada. Generalmente caliente	Inmersión, seguido de un enjuague con o sin presión.
Mecánico	Al tampón En bombo	Badana, etc... Agentes de desgaste superficial, esmeril, piedras, chips diversos, etc. Adicionadas o no de soluciones acuosas diversas.	Pulidora manual Bombos rotativos Vibradores
Térmico	Quemado	Llama	Al soplete

La siguiente Tabla 17 indica algunas fórmulas clásicas de baños de pre-desengrase para diferentes metales y aleaciones.

Tabla 17. Baños de pre-desengrase para los diferentes metales y aleaciones ¹⁶

Metal o aleación tratada Empleo	Temperatura °C	Composición en gramos por litro de la solución desengrasante (g/L)				
		Agente humectante	Sosa caustica NaOH	Carbonato sódico Na ₂ CO ₃	Fosfato trisódico Na ₃ PO ₄ 12 H ₂ O	Silicato sódico Na ₂ SiO ₃ 9 H ₂ O
Solución para <i>aleaciones ferrosas</i> exclusivamente, capaz de trabajos importantes tales como: eliminación de pinturas, grasas y aceites en gran cantidad	80-95	Teepol 1.5	37.5	25	6.2	---
Solución para <i>aleaciones ferrosas</i> y eventualmente para aleaciones de cobre, capaz de trabajos diferentes a los arriba indicados: admite piezas pulidas	80-90	0.75 ⁽¹⁾	12.5	25	12.5	12.5
Solución para <i>aleaciones de cobre, aleaciones de zinc</i> , previamente pulidas	80-90	0.75 ⁽¹⁾	---	---	25	25

Solución para <i>aluminio y aleaciones de aluminio</i>	---	0.75 ⁽¹⁾	---	---	12.5	25
--	-----	---------------------	-----	-----	------	----

⁽¹⁾ El humectante puede ser diferente al teepol (que es un alquil sulfonato y será por ejemplo un alquil-aril-sulfonato, que son estables en medios fuertemente alcalinos).

7.2 Tratamientos posteriores al desengrase electrolítico

Ya una vez realizado un pre-desengrase y desengrasado electrolítico, el tratamiento posterior es el decapado que tiene como objetivo eliminar los óxidos metálicos, la cascarilla de fabricación, el óxido de recocido y el orín de las piezas para que queden químicamente limpias.

Decapado

Los procesos de decapado se utilizan para eliminar la cascarilla de la superficie de los materiales, películas de óxido que se forman a causa de la acción atmosférica, ya que con ellas no es posible ningún recubrimiento metálico.

Este proceso puede ser químico o electrolítico. El decapado químico se utiliza para tratar aceros al carbón, metales ligeros y no ferrosos, los tratamientos electrolíticos se utilizan principalmente para los aceros al carbón y en general para los metales aleados.

Existen varios métodos, tanto de desengrase como de decapado, dependiendo de:

- Tipo de superficie a recubrir
- Metal que se recubre
- Tipo de recubrimiento
- Grado de limpieza exigido

La eficiencia de este tratamiento radica en la capacidad del ácido de reaccionar químicamente con el óxido presente en el metal.

Los ácidos generalmente utilizados en este procedimiento son: clorhídrico, sulfúrico y el fosfórico. Estos se utilizan con productos inhibidores, que limitan el ataque del ácido al óxido presente, disminuyendo el daño al metal base. Los factores más importantes que influyen a la hora de mantener el baño de decapado son: la concentración de ácido, la temperatura del baño y la duración del tratamiento.

La concentración del baño de decapado es de un 14-16 % en peso en caso de utilizar ácido clorhídrico y de un 10-14 % en peso para el ácido sulfúrico, siendo la temperatura de trabajo de 60-80 °C. En las tinas de decapado, se van introduciendo utillajes y demás materiales en función de la concentración de ácido existente en cada tina. En caso de que el decapado del material no sea correcto, se volverá a sumergir el material en la cuba hasta que se encuentre limpio.

Existen varias formas de realizar el decapado de piezas metálicas, así como diferentes productos destinados a este fin.

Métodos de decapado

Si las piezas a pre-tratar estuvieran cubiertas de óxido o cascarilla se pueden emplear sistemas mecánicos o químicos, siendo comúnmente utilizados el ácido (químico) o el arenado (mecánico).

1. *Decapado en disolución acuosa*

- Medio ácido. Ácido sulfúrico diluido, al 5-10 % y a 65-88 °C que lleva un inhibidor catódico (compuestos orgánicos. Quinona, Tiourea, Pirideno etc.). Ácido clorhídrico al 18 % en peso y a temperatura ambiente. Ácido fluorhídrico al 0.5-3 %. Ácido fosfórico. Ácido crómico.
- Medio básico: decapado y desengrase conjunto. Se emplea una disolución de sosa. Esta forma de desengrase y decapado se suele realizar al alambre. También se pueden emplear cianuros en casos puntuales.
- Decapado electroquímico: la pieza actúa como electrodo, sumergida en un baño ácido o básico.

2. *Decapado con sales fundidas*

Se realiza en medio básico con hidróxido, nitrato y carbonato sódico, a temperatura entre 450 y 500 °C. Después se sumerge en agua ligeramente ácida. Este es un procedimiento oxidante. Se puede emplear también un reductor como el hidruro de sodio.

3. *Decapado químico*

Consisten en la eliminación de los óxidos de la superficie del metal base mediante su disolución química o electroquímica. El decapado químico, es el más usado por su bajo costo, se realiza por medio de ácidos.

Los más empleados son el sulfúrico, el clorhídrico o el fosfórico, aunque en algún caso también se emplean mezclas y diferentes proporciones de ácido nítrico, el fluorhídrico, crómico y el fluoruro sódico.

4. *Decapado electrolítico*

Este método permite aumentar la acción química del ácido por medio de una intensa producción electrolítica de gases.

Las piezas a decapar se conectan al cátodo en una solución. La polarización catódica ofrece, junto con un desprendimiento de hidrógeno, una protección contra la corrosión, haciendo el proceso de decapado más rápido que en el químico.

5. *Decapado mecánico*

Consiste en proyectar a gran velocidad, mediante aire comprimido, un material agresivo en estado sólido (arena de sílice, escorias, granalla de acero, etc.) sobre la superficie en cuestión.

Con esta operación se realiza el desengrase y el decapado de una vez. Se emplean muelas abrasivas, discos de fieltro impregnados de abrasivos, cepillos, discos de telas duras, etc.

Las superficies decapadas tienden a oxidarse, por lo que se suelen someter a un posterior pasivado (inmersión en una solución diluida y caliente de ácido crómico y fosfórico) o fluxado (recubrimiento con un fundente: cloruro amónico- cloruro de cinc). De cualquier forma, las piezas deben pasar por un tanque de aclarado para eliminar restos de productos químicos o impurezas, antes de introducirse en la cuba electrolítica.

El decapado más utilizado es el que emplea disoluciones acuosas ácidas.

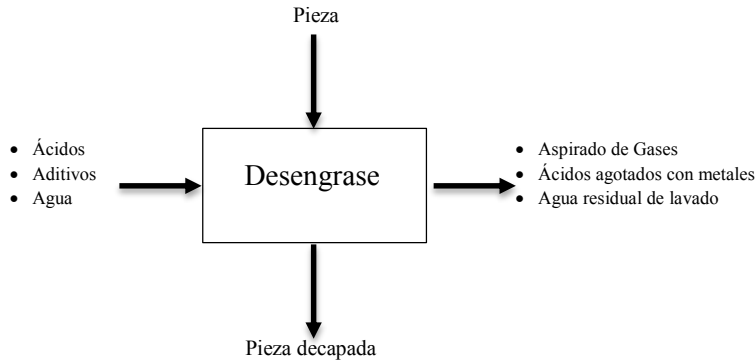


Figura 19. Operación de decapado ³¹

La siguiente Tabla 18 indica los tipos de baños que se utilizan para el decapado de algunos metales y sus aleaciones.

Tabla 18. Fórmulas de tipo de baños de decapado de metales y aleaciones corrientes ¹⁶

Metales y aleaciones	Ácidos %					Adiciones diversas	Temperatura	Duración	Agitación	
	Clorhídrico d = 1.16	Sulfúrico d = 1.83	Nítrico d = 1.38	Fluorhídrico a 52 %	Crómico g/L					
Hierro y aceros no aleados de bajo contenido en carbono		10-20				Inhibidores	40-50	Variable	+	
	20/80						15-20	Variable	+	
		5-10				Nitrato de potasio 30 g/L	50-60	Variable	+	
		5-15				Sulfato férrico anhid. 50 g/L	30-50	Variable	+	
Fundiciones		12		6-12			15-25			Peligroso de empleo
Aceros Inoxidables			6-10 9-10	1-5 1-5			15-25 50-60			Para austeníticos solamente
	1.2 25		10 5	2.4 5-10		Sulfato férrico Fe ₂ (SO ₄) ₃ 80 g/L	40-50 30-50 70-80			Acabados mates
Cobre y aleaciones	0.4 1-2	6-30 10 50	25 49-50			Serie calcinada 0.1 Ácido crómico 150 a 250 g/L Óxido de zinc 0.1 g/L	15 15 ≤ 26 15/30	5" a 30 " 5" a 60 "		Decapado simple Ligeramente brillante Decapado blanco Satinado mate
		50	50							
Aluminio y sus aleaciones	15	15-20	10 45			Acido crómico 50-75 g/L 250 cm ³ ácido fosfórico + 1 l de agua+ humectante 20-25 g/L de fluoruro sódico	15 45 40-65 90-95 15-25	5 a 10 ·		Numerosas aleaciones Duraluminio Sulfo-crómico
Magnesio			1				15			
Zinc	10				250	Sulfato sódico (Na ₂ SO ₄) ₃ g/L	15 15	5-25 ·		

7.3 Equipo para el desengrase electrolítico

El equipo para el desengrase electrolítico puede ser catiónico o aniónico, empleando electrodos de acero o de cobre. El recipiente o tanque recomendado es del mismo tipo que se sugiere para el pulido electropulido (Figura 20).

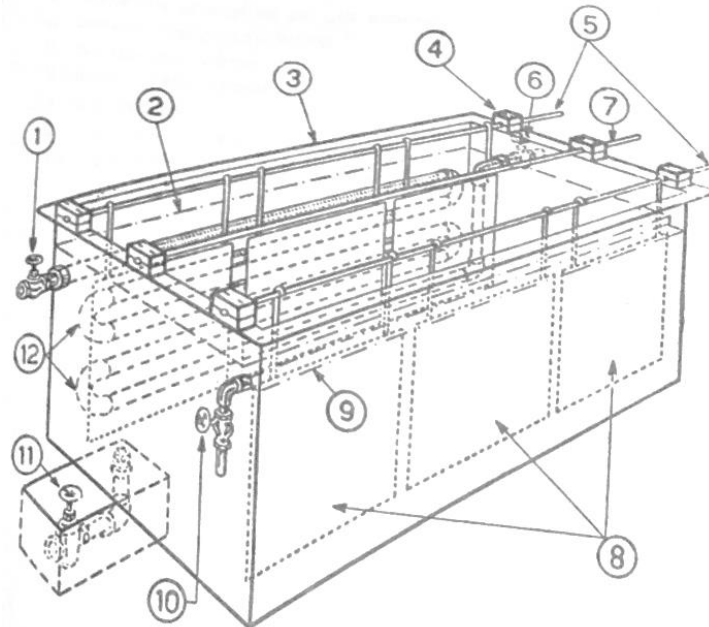


Figura 20. . Recipiente para desengrase electrolítico ¹⁷

1. Entrada del vapor para calentar el recipiente
2. Nivel máximo del baño
3. Recipiente
4. Soportes aislantes de las barras
5. Barras porta electrodos
6. Salida del vapor
7. Barra porta piezas
8. Electrodos
- 9, 10,11. Circuito de lavado
12. Circuito calentador (serpentín de vapor)

Consiste este procedimiento, en someter a la pieza a tratar, suspendida de la barra catódica (negativos) como cátodo y sumergiendo en una solución electrolítica alcalina, a la acción de la corriente eléctrica ejerciendo la función de ánodo el propio recipiente de hierro. La solución de electrolito puede trabajar en frío o en caliente (70–90 °C); aunque en este segundo caso la acción suele ser más eficaz.

Las densidades de corrientes empleadas oscilan entre 6 a 20 A/dm², dependiendo del metal que se está desengrasando y el período de desengrase, el voltaje de 3 a 12 voltios con corriente continua.

Resulta conveniente que los artículos de latón, cobre y alpaca, después del desengrasante caliente usual sean tratados en un baño de desengrase electrolítico en frío. Se emplea una tensión de 4 a 12 voltios y una densidad de corriente, según la formulación elegida, de 1 a 43 A/dm². Los artículos quedarán desengrasados con un proceso de 2 a 3 minutos de duración.

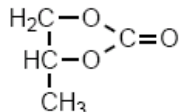
Luego del desengrase, se enjuagan bien con agua corriente, limpia y fría, agitando energéticamente. Debe tenerse especial cuidado con piezas huecas, ya que suelen llenarse de líquido, habiendo transporte de solución y pudiendo causar ello la contaminación de los baños subsiguientes.

Después de realizado el enjuague, se sumergen en agua acida, la cual se prepara diluyendo ácido sulfúrico al 10 %, se enjuaga otra vez en agua corriente, y entonces, la pieza quedara preparada para continuar el proceso. La inmersión en ácido sulfúrico diluido, tiene la finalidad de evitar transporte de residuos alcalinos a otros baños, y es imprescindible su realización para obtener un neutralizado perfecto¹⁶

7.4 Aplicaciones del desengrase electrolítico

- Carbonato de propileno en la limpieza y desengrase

El carbonato de propileno (PC) es un disolvente polar clara, orgánico a partir de la reacción de propileno con dióxido de carbono.



- Carbonato de propileno en formulaciones de limpieza y desengrasado

Sin embargo, hay otros usos reconocidos de este material en otras aplicaciones. Por ejemplo, el carbonato de propileno es frecuente en químicos intermedios, pinturas / recubrimientos, colorantes, fibras, como diluyente reactivo en sistemas de uretano, resinas aglutinantes de madera, alternativa más segura en formulaciones cosméticas de cuidado personal, y como disolventes de electrolitos para baterías de litio (entre muchos más).

- Características de rendimiento

El carbonato de propileno se utiliza por sí solo y en una variedad de uso final de limpieza y desengrasado de formulaciones debido a su versatilidad, la eficacia en la reducción de la tensión superficial, y la capacidad para mejorar la humectación y la funcionalidad de eliminación de la suciedad. Los formuladores también incorporan carbonato de propileno en sistemas de disolventes lavable con agua. El carbonato de propileno también es ampliamente compatible con otros disolventes, tales como ésteres de dimetilo, proporcionando un ingrediente eficaz en las formulaciones de co-disolvente en una variedad de suelos, resinas y sustratos.

El carbonato de propileno se usa comúnmente en los procesos y formulaciones para reducir al mínimo las preocupaciones de toxicidad y volatilidad.

Ejemplo de aplicaciones: limpieza, decapado y desengrase

- Tarjeta de circuitos electrónicos y productos de limpieza
- Poliuretano para limpiar
- Limpiadores de carburador
- Polímero / resina para limpiar
- Las tintas y limpiadores de tinta
- Poliéster insaturado para limpiar
- Todo uso industrial y de consumo a limpiar
- Piezas de estereolitografía de limpieza

Conclusiones

Este trabajo sirvió en apoyo para elaborar un manual en apoyo de técnicos e ingenieros interesados en los procesos de electrodeposición para la galvanoplastia, en donde se abordó las dos etapas más importantes de pre-tratamiento como son el pulido y desengrase electrolítico.

El interés de estas etapas de pre-tratamiento es debido a la aplicación en diferentes áreas de la industria y de la investigación, tales como instrumentación, joyería y equipos médicos entre otros. Ya que proporcionan piezas por medio de la galvanoplastia con una alta calidad superficial y estética.

La razón de presentar las etapas de los pre-tratamientos es dar alternativas para disminuir el impacto ambiental al utilizar corriente eléctrica, pues se tratara de contaminar lo menos posible ya que por medio del uso de la corriente no se emplearan productos químicos tan agresivos con el ambiente y el ser humano, ni desprendimiento de gases tóxicos.

A partir de este trabajo se determinó que el éxito de un buen electropulido, es consecuencia de realizar un desengrase electrolítico previo, ya que de él depende la adherencia del depósito metálico que se le quiera dar posteriormente. Por lo que se recopiló toda la información posible para conocer todos los tipos y métodos de procesos que se utilizan para el desengrasado de piezas, así como la composición de los electrolitos y equipos que se utilizan.

Por último para concluir hay Normas que nos permiten dar especificaciones de mayor interés sobre el pulido electrolítico, y que son elaboradas por la American Society for Testing Materials (ASTM) estas normas definen los términos técnicos y el procedimiento para obtener un electropulido de calidad.

Anexo

Aceros inoxidable

La razón principal que este tipo de aceros lleve ese nombre, es su resistencia a la corrosión. La presencia del cromo en su composición siendo el principal elemento aleante, debido a que es un elemento reactivo, pero en las aleaciones que contienen cromo se pasivan conteniendo por lo menos un 11 %, exhibiendo una excelente resistencia a muchos ambientes.

En la actualidad se dispone de un gran número de aleaciones resistentes a la corrosión, con propiedades mecánicas definidas, variando el costo en forma considerable. En nuestro medio, a pesar que la demanda de estos materiales ha aumentado significativamente, la industria nacional sigue cubriendo casi el 90% de sus necesidades de aceros inoxidable con apenas dos o tres tipos de estas aleaciones, siendo los más representativos las aleaciones AISI 304 y AISI 316.

Sin embargo la clasificación de los aceros inoxidable está dividida en 3 grupos, tales como:

- 1. Ferríticos.-** Reciben su nombre debido a que su microestructura está constituida completamente por ferrita. Son los más económicos debido a su bajo contenido de Ni. Debido a su buena resistencia a la corrosión bajo tensión, a la corrosión por picaduras y por resquicios, pueden ser seleccionados en determinadas aplicaciones, como alternativa a los aceros inoxidable austeníticos.
- 2. Austeníticos.-** Son aleaciones no magnéticas endurecibles por conformado en frío, pero no por tratamiento térmico. Su microestructura está constituida fundamentalmente por granos de austenita. La presencia de Ni en estos aceros permite estabilizar la fase austenítica, pues de otro modo la adición única de Cr produciría una microestructura ferrítica a temperatura ambiente. Los aceros inoxidable austeníticos tienen una excelente resistencia a la corrosión, muy buena conformabilidad y en términos generales son fácilmente soldables.
- 3. Martensíticos.-** Son aleaciones que tienen una estructura austenítica a elevadas temperaturas y que puede ser transformada a martensita después de un tratamiento térmico de temple, elevando su dureza y resistencia al desgaste.

En la Tabla 1 se muestra la clasificación de los aceros inoxidable, ejemplo de ellos con sus composiciones químicas nominales.

TABLA 1 : Distintos tipos de aceros inoxidable									
AISI	UNS	%C	%Mn	%Si	%Cr	%Ni	%P	%S	Otros
ACEROS INOXIDABLES FERRÍTICOS									
405	S40500	0,08	1	1	13	--	0,04	0,03	0,2 Al
430	S43000	0,12	1	1	17	--	0,04	0,03	--
434	S43000	0,12	1,25	1	17	--	0,04	0,03	1,0 Mn
446	S44600	0,2	1,5	1	25	--	0,04	0,03	0,25 N
18SR		0,004	0,3	1	18	--	--	--	2,0 Al, 0,4 Ti
A129-42	S44800	0,01	0,3	0,2	29	2,2	0,025	0,02	3,8 Mo
ACEROS INOXIDABLES AUSTENÍTICOS									
303	S30300	0,15	2	1	18	9	0,2	>0,15	0,06 Mo
304	S30400	0,08	2	1	19	9,2	0,045	0,03	---

316	S31600	0,08	2	1	17	12	0,045	0,03	2,0 Mo
317	S31700	0,08	2	1	19	13	0,045	0,03	3,5 Mo
321	S32100	0,08	2	1	19	14	0,045	0,03	Ti = 5 x C _{min}
347	S34700	0,08	2	1	18	11	0,045	0,03	C _b + T _a = 10 x C _{min}
20 Mo6		0,03	1	0,8	24	35	0,03	0,03	5,7 Mo 3 Cu
254 Smo	S31254	0,03	1	0,8	20	18	0,03	0,01	6,2 Mo 9,7 Cu 0,2 N
ACEROS INOXIDABLES MARTENSÍTICOS									
403	S40300	0,15	1	0,5	12,2		0,04	0,03	
410	S41000	0,15	1	1	12,2		0,04	0,03	
416	S41600	0,15	1,25	1	13	--	0,04	0,03	0,6 Mo
431	S43100	0,2	1	1	16	1,9	0,04	0,03	-
440A	S44002	0,67	1	1	17	--	0,04	0,03	0,75 Mo
416 PLUS	S41610	0,15	1	1	13	--	0,06	>0,15	0,6 Mo

Las aplicaciones principales para los aceros abordados en este trabajo son:

El acero inoxidable del tipo AISI 304 posee una buena resistencia a la corrosión atmosférica y se lo emplea en forma significativa en la industria química, alimentaria y médica. Cuando las condiciones de servicio exigen una mayor resistencia a la corrosión por picaduras se emplea el acero inoxidable del tipo AISI 316 que es empleado mayormente en procesos industriales como la elaboración del papel y en la industria alimentaria.

De esta manera, vieron la luz nuevos tipos de aleaciones más resistentes como el grado AISI 317 y los aceros inoxidables “súper-austeníticos” con adiciones mayores de Mo y N. Considerada como uno de los aceros inoxidables austeníticos comerciales de mayor aleación fabricado hasta la fecha, capaz de competir en resistencia a la corrosión con la mayoría de las súper aleaciones de base Níquel. Estas nuevas aleaciones son empleadas en procesos químicos donde hay presencia de medios muy agresivos (elevadas concentraciones de cloruros y altas temperaturas de operación). Aplicaciones típicas son las plantas de procesamiento de la pulpa de papel, sistemas de conducción de agua de mar, construcción de elementos estructurales de plataformas offshore, etc.

AISI – SAE

La norma AISI/SAE (también conocida por SAE-AISI) es una clasificación de aceros y aleaciones de materiales no ferrosos. Es la más común en los Estados Unidos.

AISI es el acrónimo en inglés de *American Iron and Steel Institute* (Instituto americano del hierro y el acero), mientras que SAE es el acrónimo en inglés de *Society of Automotive Engineers* (Sociedad de Ingenieros Automotores).

En 1912, la SAE promovió una reunión de productores y consumidores de aceros donde se estableció una nomenclatura y composición de los aceros que posteriormente AISI expandió.

En este sistema los aceros se clasifican con cuatro dígitos. El primero especifica la aleación principal, el segundo indica el porcentaje aproximado del elemento principal y con los dos últimos dígitos se conoce la cantidad de carbono presente en la aleación

Bibliografía

1. Rodríguez P.C. "*Galvanoplastia aplicada: Teoría y práctica*". Ed. Alsina; Buenos Aires, Argentina, 1998.
2. Langford K.E. "*Análisis de baños electrolíticos*". Ed. Aguilar; España, 1963.
3. Ulick R. E. "*Corrosiones metálicas*", Ed. Reverté, S. A.; Barcelona, España, 2003.
4. Esquivel L.L. "*Manual de recubrimientos metálicos: Una guía paso a paso*". Ed. Trillas; Mexico, D.F, 1995.
5. ASM (Handbook Committee American Society for Metals). *Metals handbook*. Ed. American Society for Metals; 1985.
6. Mondon R., Grau V.M. "*Pulido electrolítico*". Ed. S. I. s. n., Madrid, España, 1961.
7. www.inoxidable.com/electropulido.htm. Junio 2014
8. Fedotiev N.P., Grilijes S.Y., Siurana F.P. "*Electropulido y anodización de metales*". Ed. Gustavo Gili; Barcelona, España, 1972.
9. Ayala O., Flores J.C., Mendoza W. "*Diseño y construcción de una celda para pulido y ataque electrolítico en muestras metalográficas*". 2004; Licenciatura, Universidad de el Salvador.
10. Alban S. I. "*Caracterización del proceso de electropulido del bronce*". 1997; Guayaquil, Ecuador, Licenciatura, Escuela Superior Politecnica del Litoral.
11. Morral F.R., Jimeno E., Molera P. "*Metalurgia general tomo II*". Ed. Reverté, S. A.; Barcelona, España, 2009.
12. Ortega M. J. A. "*Corrosión industrial*". Ed. Marcombo S. A.; Barcelona, España, 1990.
13. Nerey C. L. M. "*Corrosión y protección industrial*". Ed. Coordinación del Estado Mérida, Salpica, 2002.
14. Moore H.D., Kibbey D.R. "*Materiales y procesos de fabricación: Industria metalmeccánica y de plásticos*". Ed. Limusa; Mexico, D.F, 1987.
15. Ocw.Uc3m.Es/...Clase/ocw_rugosidades.
16. Glayman J., Farkas G. "*Galvanotecnia: Técnica y procedimientos*". Ed. Cedel; Viladrau (Gerona)- Barcelona, 1980.
17. Orozco H. C. "*Manual galvanotecnico de los procesos de niquelado, cobrizado y cromado*". 1992; Licenciatura UNAM.
18. Puig Z. L., Soto F. O. "*Tecnología general de la galvanotecnia*". Ed. Pueblo y Educación; La Habana, 1990.
19. Salvadó E.J. "*Recubrimientos electrolíticos brillantes*". Ed. Cedel; Barcelona, España, 1963.
20. Ceballos E. M. "*Rediseño del proceso de cincado de la empresa metalquímica galvano*". Quito, Ecuador, 2008; Licenciatura Escuela Politecnica Nacional.
21. www.abccorporate.com A, "Electropolishing". Junio 2014
22. Graham A.K., Pinkerton H.L. "*Manual de ingeniería de los recubrimientos electrolíticos*". Compañía Editorial Continental; México, D.F, 1967.
23. Grau V.M. "*Los costes en galvanotecnia*". Ed. Cedel; Barcelona, España, 1975.
24. Salvadó E.J. "*Electrodeposición de metales: Fundamentos, operaciones e instalaciones*". Ed. E.J.S.; Barcelona, España, 2000.
25. Blum W., Hogaboom G.B. "*Galvanotecnia y galvanoplastia: Dorado-plateado-niquelado-cromado*". Ed. Continental; México, D:F, 1989.
26. Layner VI. "*Electrolytic polishing and etching of metals*". Mashgiz. 1947

-
-
27. Layner VI. "*Electropolishing metal parts. Gizmestprom*". 1947
 28. Bogorad LYG, S. Y. and Arson, R. S. "*Electropolishing steel*", lenizdat. 1951
 29. Fedotiev NP, Kruglova, E. G. and Grilijes, S. Y. "*The regeneration of the solution for the polishing of steel*", zhur. Priklad. Khim. 1954
 30. Grau V.M. "*Cromado duro: (la práctica y aplicaciones del mismo)*". Ed. José Montesó; Barcelona, España. 1957.
 31. Martínez M., Salas E., Torres M. "*Recuperación de metales pesados en aguas residuales por biomasa*". 2003; Licenciatura UAM.