



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

Generación de recubrimiento de cobre sobre acero de bajo carbono
SAE 1018

Tesis

Que para obtener el título de ingeniero mecánico

Presenta:

Morales Pérez Juan Rafael

Asesor de tesis:

Dr. José Javier Cervantes Cabello

Agradecimientos.

La presente tesis es un esfuerzo y homenaje, a todas aquellas personas maravillosas que a lo largo de los años han estado a mi lado en las buenas y en las malas.

Gracias a mis padres Héctor y Guadalupe, por ser un ejemplo de vida, por siempre apoyarme en todo, por ser un ejemplo de superación y progreso, por enseñarme el camino del amor, el éxito, a ser una mejor persona, gracias por todo.

Gracias a mi hermano Áaron, por ser una persona muy importante en mi vida, llena de amor, y siempre tener un consejo listo para dar, gracias por siempre estar ahí cuando te necesito, por todo el apoyo que me has brindado.

Gracias a mi hermana Alba, por siempre apoyarme, por siempre ser una gran persona llena de amor y cariño.

Gracias a mi tío el Dr. Omar y su esposa Sandra, por ser un ejemplo a seguir, por siempre apoyarme y estar llenos de amor.

Gracias a mi tía la Prof. Olga, mi abuelita Florita y mi tía Mirta por quererme tal y como soy por ser unas personas cariñosas y brindarme todo su corazón.

Gracias a todos mis primos y tíos por ser unas personas muy importantes en mi vida y siempre ayudarme en todo.

Gracias a el Dr. Javier Cervantes por guiarme a través de este proceso y brindarme su sabiduría y apoyo.

Gracias al M.I. Carlos Alberto, por la paciencia invertida en este trabajo, por el tiempo y por la sabiduría presentadas en esta tesis.

Gracias al Dr. Arturo Barba por haberse tomado la molestia de revisar este trabajo.

Gracias al M.I. Eduardo Garduño por haber corregido este trabajo.

Gracias al Ing. Cortes Rosas por haber revisado este trabajo.

Gracias a todas aquellas personas que ya no se encuentran entre nosotros.

Índice temático

Introducción.	5
Objetivo.	6
Alcances.	6
Capítulo I. Propiedades, características y aplicaciones del cobre.	7
Tema I.1 Propiedades físicas y químicas del cobre.	7
Tema I.2 Propiedades de masa constante.	7
Tema I.3 Propiedades eléctricas.	8
Tema I.4 Propiedades térmicas.	9
Tema I.5 Formas en que se presenta el cobre puro.	10
Tema I.6 Características estéticas y aplicaciones del cobre.	12
Capítulo II. Propiedades, características y aplicaciones del acero SAE 1018.	14
Tema II.1 Composición química del acero SEA 1018.	14
Tema II.2 Propiedades de masa constante.	14
Tema II.3 Propiedades eléctricas.	14
Tema II.4 Propiedades térmicas.	14
Tema II.5 Propiedades mecánicas del acero.	15
Tema II.6 Aplicaciones.	15
Capítulo III. Técnicas para la obtención de recubrimientos.	17
Tema III.1 Tipos de recubrimientos.	17
Capítulo IV. Técnicas de electrodeposición de cobre sobre acero.	20
Tema IV.1 Sistemas de electrodeposición.	20
Tema IV.2 Cobrizado.	21
Tema IV.3 Leyes de Faraday de la electrólisis.	24
Capítulo V. Desarrollo experimental.	27
Tema V.1 Desarrollo experimental.	27
Tema V.2 Características del ánodo.	28
Tema V.3 Consideración de parámetros para el depósito	29
Capítulo VI. Metodología para la obtención del recubrimiento	32

Tema VI.1 Preparación de la superficie.	.....	32
Tema VI.2 Preparación del objeto.	.....	33
Tema VI.3 Preparación de la sustancia.	.....	34
Tema VI.4 Metodología para la obtención del recubrimiento con una fuente de alimentación externa.	.....	34
Tema IV.5 Metodología para la obtención del recubrimiento sin fuente de alimentación.	.....	35
Capítulo VII. Optimización de parámetros.	.....	38
Tema VII.1 Determinación de la corriente límite.	.....	38
Tema VII.2 Determinación del parámetro de lijado y acabado superficial.	.....	40
Tema VII.3 Determinación de los tiempos óptimos dependiendo de la concentración de la sustancia.	.....	44
Capítulo VIII. Obtención del recubrimiento	.....	62
Tema VIII.1 Procedimiento para la obtención del recubrimiento.	.....	62
Capítulo IX. Depósitos de cobre.	.....	79
Tema IX.1 Observación de malos depósitos de cobre mediante un estereoscopio.	.....	79
Tema IX.2 Observación de buenos depósitos de cobre mediante un estereoscopio.	.....	80
Tema IX.3 Metalografía de los mejores depósitos de cobre	.....	81
Capítulo X. Conclusiones.	.....	83
Tema X. Conclusiones.	.....	83
Capítulo XI.	.....	85
Bibliografía	.....	85
Mesografía	.....	86

• INTRODUCCIÓN

Los tratamientos de superficie son para mejorar ciertas propiedades en el material base, por ejemplo, la resistencia a la corrosión o la conductividad eléctrica. En general, estos tratamientos no afectan al conjunto de las propiedades mecánicas. Los tratamientos de superficie pueden aplicarse al final del proceso de los componentes y son, en todos los aspectos, procedimientos de acabado.

De esta forma, el gasto extra que supone fabricar aleaciones raras puede eliminarse y dirigir la economía de modo más satisfactorio en el sentido deseado; por tanto, un metal o una aleación barata, como un acero de bajo carbono SAE 1018, puede emplearse para que proporcione las propiedades metálicas al conjunto, mientras que una aleación más cara, como es el cromo o el estaño, puede emplearse para mejorar las propiedades superficiales requeridas.

El modo de protección de un sustrato metálico por medio de un recubrimiento metálico depende de la naturaleza del par galvánico que hay entre ellos, es decir, si el recubrimiento es electropositivo o electronegativo con respecto al metal base. El acero puede protegerse satisfactoriamente con níquel y zinc, a pesar de que el níquel es catódico con respecto al hierro, en contraste con el comportamiento anódico del zinc. El níquel es relativamente más resistente a la corrosión en muchos medios; además, tampoco tiene el inconveniente de formar un producto de corrosión desagradable y voluminoso, la herrumbre.

Los recubrimientos metálicos se obtienen por una variedad de técnicas, muchas de las cuales se aplican también a los no metales, como los plásticos y los polímeros. Por el tonelaje de productos acabados, la electrodeposición está muy por encima de las demás, aunque técnicas más sofisticadas se han desarrollado para unas finalidades específicas, en donde el costo o la calidad tienen más importancia que la propia cantidad.

Objetivo:

Determinar los parámetros que permitan obtener recubrimientos de calidad de cobre sobre acero SAE 1018

Alcances:

En este trabajo solo se llegará hasta una serie de pasos que se necesitan para realizar un recubrimiento de cobre sobre un acero de bajo carbono, así como mencionar los principales factores que afectan dicho recubrimiento.

Se darán recomendaciones para realizar un depósito de cobre sobre una pieza de acero de bajo carbono.

Capítulo I.

Propiedades, características y aplicaciones del cobre.

Tema I.1 Propiedades físicas y químicas del cobre

El cobre es un metal duro, de color rojizo, inerte y pesado, extraordinariamente dúctil y maleable.

Después de la plata (Ag), el cobre es el mejor conductor de la electricidad.

El cobre, químicamente es resistente a los agentes atmosféricos, y no se corroe fácilmente a temperaturas normales.

En la actualidad se sabe que el cobre: destruye microorganismos y bacterias existentes en el ambiente, impide la fijación de algas y organismos marinos¹.

Tema I.2 Propiedades de masa constante

Compresibilidad

La compresibilidad es una medida de la facilidad con que los átomos de metal se acercan. Una compresibilidad baja indica que la unión de los átomos es débil. El cobre tiene una alta compresibilidad, al igual que otros elementos del subgrupo IB (metales).

Cuando la temperatura de un cristal se eleva, la amplitud de las vibraciones atómicas es mayor y el cristal se expande, esto se refleja en el coeficiente de expansión.

Densidad.

La densidad del cobre varía de 8.90 a 8.95 $[g/cm^3]$, inicialmente la densidad disminuye con el aumento de grados de trabajo en frío debido a la generación de vacantes y dislocaciones. El valor promedio que se ha aceptado de la densidad para el cobre es de 8.94 $[g/cm^3]$ a 25 °C¹.

¹ Copper, its trade, manufacture, use and environmental status, Gunter Joseph, ed. Konrad J.A.

Tabla 1.1 Densidad del cobre a 20 °C

Estado	ρ [g/cm^3]
Monocristalino	8.95285
Fundido y solidificado en el vacío	8.94153
comercial suave trefilados, recocidos en vacío	8.92426
Diámetro reducido 96.81%	8.91187

Tema I.3 Propiedades eléctricas

Conductividad y resistividad.

En 1913, el nivel de conductividad del cobre puro recocido, se fijó por la Comisión Electrotécnica Internacional por sus siglas en inglés IEC, las características del espécimen estudiado fueron las siguientes: Alambre de cobre recocido de 1m de largo, con un peso de 1g y con una densidad de $8.89 \text{ [g/cm}^3\text{]}$, el cable mostró una resistencia de 0.15328 ohm. A este valor se le asignó una conductividad del 100% de la Norma Internacional del Cobre Recocido por sus siglas en inglés IACS. La resistividad del cobre de estas características fue de $0.017241 \text{ [}\Omega \bullet \text{mm}^2/\text{m}\text{]}$.

La conductividad y resistividad dependen en gran medida de la pureza del material. Los niveles de pureza y las técnicas de tratamiento han mejorado considerablemente, esto también ayuda a tener mediciones más exactas de las características del material.

El valor más utilizado en la práctica de la ingeniería, es a temperatura ambiente de 20 °C, la conductividad del cobre muy puro es de aproximadamente 103.6% IACS, la resistividad correspondiente es de $0.016642 \text{ [}\Omega \bullet \text{mm}^2/\text{m}\text{]}$.

Normalmente, la conductividad eléctrica del cobre disminuye al aumentar la temperatura. Los efectos producidos por pequeñas cantidades de elementos de aleación en solución sólida y por la deformación en frío, son independientes de la temperatura. El aumento de la resistencia provocada por pequeñas cantidades de elementos secundarios en solución sólida se muestran en la tabla 1.2.

Tabla 1.2 Incremento de la resistencia del cobre con adiciones de soluto pequeñas

Soluto	Solubilidad a temperatura ambiente, wt%	Incremento de la resistencia del cobre en % [$\mu\Omega\text{-cm}$]	Rango de incremento de la resistencia de cobre en % [$\mu\Omega\text{-cm}$]
Ag	0.1	0.6	0.1-0.6
Al	9.4	0.95	0.8-1.1
As	6.5	6.7	6.6-6.8
Au	100.00	0.55	0.5-0.6
B	0.06	1.4	0.5-0.6
Be	0.2	0.65	1.4-2.0
Ca	<0.01	0.3	0.6-0.7
Cd	<0.5	0.3	.....
Co	0.2	6.9	0.21-0.34
Cr	<0.03	4	6.0-7.0
Fe	0.1	8.5	3.8-4.2
Ga	20	1.4	8.5-8.6
Ge	11	3.7	1.3-1.5
Hg	---	1	3.6-3.75
In	3	1.1	.....

Tema I.4 Propiedades térmicas

Conductividad térmica

La conductividad térmica del cobre puro va desde 2780 [$W/m \cdot K$] cerca de 0 °K hasta 177 [$W/m \cdot K$] en 2273 °K, con un máximo de 19600 [$W/m \cdot K$] en alrededor de 10 °K. Algunas aleaciones de cobre reducen su conductividad térmica.

En términos prácticos, los elementos aleantes mejoran notablemente otras características tales como las propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión, sin embargo, el valor de la conductividad térmica es afectada y genera pérdidas. Los cambios en la conductividad térmica inducida por aleación son de la misma magnitud relativa a los de la conductividad eléctrica.

Aleaciones de cobre-níquel C71500, son los más utilizados para intercambiadores de calor debido a su alto coeficiente de transferencia, también tiene una alta resistencia a la corrosión lo que hace que sean más rentable para las opciones de servicio a largo plazo.

Las propiedades térmicas del cobre puro son las siguientes:

- Punto de Fusión: $T_m=1084.88\text{ }^\circ\text{C}$.
- Calor de Fusión: $\Delta H_f=134$
- Calor de Vaporización: $\Delta H_v=3630\text{ [J/g]}$
- Calor de sublimación a 1299 °K: $\Delta H =3730\text{ [J/g]}$
- Punto de Ebullición: $t_b=2595\text{ }^\circ\text{C}$
- Conductividad Térmica: $398\text{ [W/m}\cdot\text{K]}$
- Coeficiente de expansión térmica a 20°C: $16.7\text{ (}\mu\text{m/m/}^\circ\text{C)}$
- Calor Especifico a 20 °C: $C_p=0.092\text{ [cal/g]}$

Tema I.5 Formas en que se presenta el cobre puro

Las formas principales en que se presenta el cobre puro son:

- ❖ Cobre térmico tenaz
- ❖ Cobre térmico de alta conductividad
- ❖ Cobre electrolítico tenaz
- ❖ Cobre exento de oxígeno
- ❖ Cobre desoxidado con fósforo, con bajo contenido de fósforo residual
- ❖ Cobre desoxidado con fósforo, con alto contenido de fósforo residual

EL COBRE TÉRMICO TENAZ, contiene 99.85% de cobre, siendo el resto oxígeno e impurezas.

EL COBRE TÉRMICO DE ALTA CONDUCTIVIDAD, es el cobre térmico que ha sido sometido a mejores condiciones de refinación que aumentan su conductividad.

EL COBRE ELECTROLÍTICO TENAZ, es un cobre con refinado térmico que ha sido colado en ánodos que luego se refinan electrolíticamente. Tiene un contenido de 99.9% de cobre.

EL COBRE EXENTO DE OXÍGENO, contiene un 99.95 % de cobre, manteniendo la misma buena conductividad. Es caro y su aplicación es escasa.

EL COBRE DESOXIDADO CON FÓSFORO CON BAJO CONTENIDO DE FÓSFORO RESIDUAL, contiene un 99.9% de cobre, 0,005 a 0,012% de fósforo (P) y tiene una conductividad de 85 a 98% indicada por la Norma Internacional del Cobre Recocido.

Los diagramas 1.1 y 1.2 muestran diagramas de equilibrio del cobre con níquel y cobre con azufre.

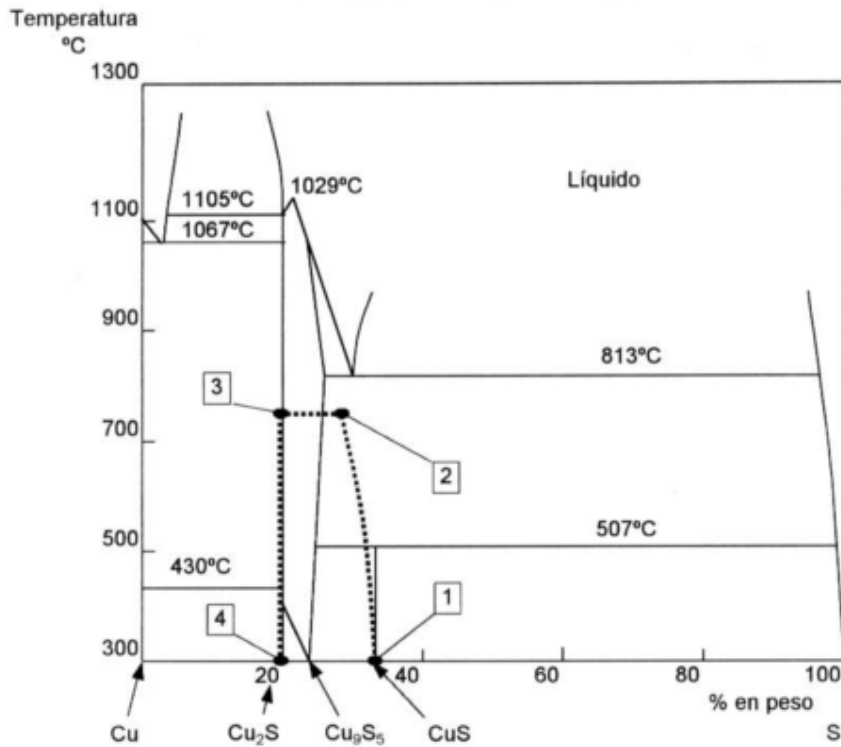


Diagrama de equilibrio 1.1 de cobre con azufre.

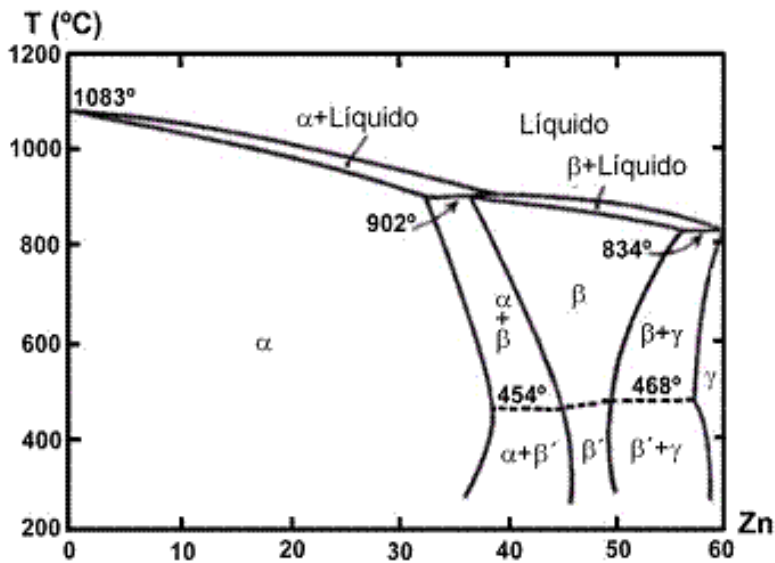


Diagrama de equilibrio 1.2 cobre con porcentaje de zinc.

Para el caso del diagrama de equilibrio 1.2 sucede lo siguiente:

La resistencia a tracción y el límite elástico aumentan al crecer la proporción de zinc, se produce un salto al aparecer la fase β , alcanza el máximo a la composición correspondiente a partes iguales de alfa y β , y en cuanto aparece la fase γ y desciende, rápidamente, la resistencia a la tracción.

El alargamiento asciende hasta un máximo y comienza a disminuir antes de alcanzar la composición límite de la disolución sólida alfa a medida que aumenta la cantidad de β disminuye considerablemente el alargamiento, y este es muy pequeño en presencia de γ .

La fase alfa tiene la mayor resistencia al choque, pero disminuye en cuanto aparece β , y la aleación es muy frágil cuando contiene γ .

La dureza aumenta mucho con la presencia de β y aun más con la de γ .

Las aleaciones que solo contienen alfa se trabajan muy bien y se pueden laminar en caliente y en frío; las que contienen alfa y β solo se pueden laminar en caliente, pues en frío se deforman muy poco sin que haya rotura.

Tema I.6 Características estéticas y aplicaciones del cobre

En arquitectura y decoración, el cobre es muy apreciado porque une belleza (propiedad estética) y resistencia a los agentes atmosféricos y a la corrosión.

El color natural del cobre es rosado salmón, pero aparece a menudo rojizo debido a su oxidación superficial.

La oxidación que sufre el cobre en contacto con el aire, es superficial y lo protege de toda oxidación posterior.

Con los años, la capa superficial oxidada se torna verde claro.

La aplicación por excelencia del cobre es como material conductor (cable), al que se destina alrededor del 45% del consumo anual de cobre. Otros usos son:

- Tubos de condensadores y fontanería.
- Electroimanes.
- Motores eléctricos.
- Interruptores y relés, tubos de vacío, magnetrón de hornos de microondas.
- Se tiende al uso del cobre en circuitos integrados en sustitución del aluminio de menor conductividad.
- Acuñación de moneda (aleado con níquel), escultura (Estatua de la Libertad (Nueva York)), construcción de campanas y otros usos ornamentales en aleaciones con zinc (latón), estaño (bronces) y plata (en joyería).

El sulfato de cobre es el compuesto de cobre de mayor importancia en la industria y se emplea en agricultura, purificación del agua y como protector de la madera.

Capítulo II.

Propiedades, características y aplicaciones de acero SAE 1018..

Tema II.1 Composición química del acero SAE 1018

Este acero de bajo carbono tiene buena soldabilidad y ligeramente mejor maquinabilidad que los aceros con grados menores de carbono. Debido a su alta tenacidad y baja resistencia mecánica, es adecuado para componentes de maquinaria.

Los componentes del acero SAE 1018 se muestran en la tabla 2.1

Tabla 2.1 Composición de acero SAE 1018

C	0.18 %
Mn	0.6 – 0.9 %
P Max	0.04 %
S Max	0.05 %

Tema II.2 Propiedades de masa constante

Densidad

La densidad del acero SAE 1018 es de $7.87 \text{ [g/cm}^3\text{]}$, un valor promedio de la densidad que se ha aceptado es de $7.85 \text{ [g/cm}^3\text{]}$.

Tema II.3 Propiedades eléctricas

Posee una alta conductividad eléctrica (94-95% IACS), aproximadamente de $3 \cdot 10^6 \text{ [}\Omega^{-1}/\text{m]}$, aunque depende de su composición. En líneas aéreas de alta tensión, se utiliza con frecuencia conductores de aluminio con alma de acero, proporcionando éste último, la resistencia mecánica y así se optimiza el costo de la instalación.

Tema II.4 Propiedades térmicas

El punto de fusión del acero depende del tipo de aleación y los porcentajes de elementos aleantes. El de su componente principal, el hierro es de alrededor de $1510 \text{ }^\circ\text{C}$ en estado puro (sin alear), sin embargo el acero presenta frecuentemente temperaturas de fusión de alrededor de $1375 \text{ }^\circ\text{C}$, y en general la temperatura necesaria para la fusión aumenta a

medida que se funde. Por otra parte los aceros con una mayor resistencia a la temperatura y al desgaste (aceros rápidos) se funden a 1650 °C.

El valor promedio de la conductividad térmica de los aceros es de $45 [m^{-1}/K^{-1}]$, existen diversos factores que pueden afectar la conductividad térmica entre ellos la densidad, la humedad, la dirección de flujo de calor y la temperatura. En general, aumenta con la densidad, la humedad y la temperatura.

Su punto de ebullición es de alrededor de 3000 °C.

Tema II.5 Propiedades mecánicas del cobre

La dureza de los aceros varía entre la del hierro y la que se puede lograr mediante su aleación u otros procedimientos térmicos o químicos entre los cuales quizá el más conocido sea el templado del acero.

Algunas de las propiedades mecánicas del acero SAE 1018 se enlistan en la tabla 2.2

Tabla 2.2 Propiedades mecánicas del acero SAE 1018

Dureza Brinell	126 (HB)
Esfuerzo de fluencia	370 (MPa)
Esfuerzo máximo	440 (MPa)
Reducción de área	40 %
Elongación máxima	15 %
Módulo de elasticidad	205 (GPa)

Tema II.6 Aplicaciones

Se utiliza en operaciones de deformación plástica como remachado y extrusión. Se utiliza también en componentes de maquinaria debido a su facilidad para conformarlo y soldarlo. Piezas típicas son los pines, cuñas, remaches, rodillos, piñones, pasadores, tornillos y aplicaciones de lámina.

El acero 1018 está entre los más utilizados en el mundo. Encontrándolo en el mercado, en secciones circulares, cuadradas, barras planas y hexágonos. A pesar de sus bajas propiedades mecánicas, la aleación es fácilmente conformada, mecanizada, soldada y fabricada.

El acero 1018 es valorado al 62% de la maquinabilidad del acero al carbono 1112. Esta aleación puede ser fácilmente pulida, sus granos son continuos y duros. Puede ser mecanizado en todas las condiciones.

El acero 1018 puede ser fácilmente conformado en estado recocido, siendo soldado con éxito usando la mayoría de las prácticas comunes, gas, resistencia, oxiacetileno y soldadura por fusión sumergida.

La **corrosión** es la mayor desventaja de los aceros ya que el hierro se **oxida** con suma facilidad incrementando su volumen y provocando grietas superficiales que posibilitan el progreso de la oxidación hasta que se consume la pieza por completo.

Capítulo III.

Técnicas para la obtención de recubrimientos.

Tema III.1 Tipos de recubrimientos

Los métodos de obtención de los recubrimientos pueden resumirse de la siguiente manera:

a) Electrodeposición. Todos los metales se pueden electrodepositar a partir de un electrolito, pero para la mayor parte de casos prácticos, no hay que considerar los baños no acuosos -disolventes orgánicos o sales fundidas-, excluyendo así los metales como el aluminio o el titanio de la aplicación como electrodeósitos. El procedimiento puede ser continuo o discontinuo. El cromado es, tal vez, lo más conocido, y consiste, en generar, una capa delgada de cromo sobre una capa más gruesa de níquel y/o cobre, un ejemplo de estos depósitos son en la electrónica para contactos y cables de corriente, también se emplean en la industria como agente anticorrosivo, estos depósitos generalmente son baratos y fáciles de realizar.

b) Depósito químico o sin corriente. Para promover el depósito sobre una superficie metálica se puede utilizar un proceso de reducción acuosa, en el cual, el metal se deposita a partir de la solución, generalmente bajo una acción catalítica. La velocidad del depósito es de ordinario lenta e invariable, lo que hace que el proceso sea inflexible. El níquel es el metal que más se deposita por este método; sin embargo, otros metales se han depositado químicamente, en especial en la fase previa al recubrimiento de plásticos, antes del electroacabado convencional, en particular ciertos metales reactivos, como son el aluminio magnesio, y titanio, que no se pueden electrodepositar de soluciones acuosas, pueden que resulten unos excelentes recubrimientos para la protección contra la corrosión un ejemplo son los plásticos moldeables y muy rígidos.

c) Inmersión en caliente. Como su nombre lo indica, el recubrimiento metálico se aplica al componente o metal base en forma de líquido, y puede hacerse de manera continua o por un proceso discontinuo. La formación de una capa aleada es una parte integrante del proceso, y así la adhesión es en general muy fuerte. Este método se adapta mejor a metales de bajo punto de fusión, tales como el estaño, plomo, cinc y aluminio, y cuando se requieren espesores de recubrimiento relativamente gruesos (mayor a 0.01 mm). La desventaja del proceso es que el control del espesor es deficiente y no se pueden obtener, satisfactoriamente, depósitos delgados, la amplia aplicación del estaño se debe fundamentalmente a que no es tóxico por lo que los productos estañados tienen gran demanda en las industrias alimenticias y conserveras.

d) Metalización por proyección (rociado). La aplicación de un recubrimiento metálico por rociado es particularmente valiosa para estructuras de acero, ya que la pistola de metalizar puede ser portátil y puede recubrirse una gran estructura acabada. La técnica es más adecuada para metales de punto de fusión bajo, como el zinc y el aluminio, aunque el acero inoxidable también puede pulverizarse con buen resultado, pero no óptimo.

e) Chapeado. La facultad de adherirse de un recubrimiento en forma de chapa por medio de la presión de rodillos sobre una superficie plana depende fundamentalmente de la formación de un buen enlace entre los dos metales. Las dos variables principales son la temperatura y la presión de los rodillos, el problema práctico es la eliminación de las capas de óxidos en las interfases. El cobre puede ser chapeado sobre el acero con bastante facilidad; en cambio, el chapeado del aluminio o del acero inoxidable sobre acero de bajo carbono sólo es posible, después de una cuidadosa preparación superficial y de la soldadura o sinterización como una ayuda para facilitar la unión, un ejemplo es: el laminado del oro y la chapa de plata sobre un metal base fundamentalmente cobre, también el chapeado del acero con cobre se hace en general por fusión, y en particular útil para alambres y tubos.

f) Electrofóresis. El depósito electroforético proporciona un medio de recubrir un sustrato con un metal en forma de polvo u óxido, pero tiene que seguirse por un tratamiento térmico, en el cual el recubrimiento se sinteriza y se adhiere a la superficie del metal base. El polvo está presente como partículas cargadas electrostáticamente en un disolvente polar, como un alcohol, mejor que en forma de iones. En general, no es posible obtener un depósito que no contenga poros con un tamaño menor de 0.01 mm, por lo que el producto tiene un empleo limitado. Se han desarrollado métodos para el aluminio y el níquel, y también para materiales no metálicos, como los plásticos, ejemplos de estos depósitos se dan en la industria automotriz, principalmente en el área de pintura.

g) Depósito en vacío. Esta técnica puede usarse en frío y no depende de las propiedades metálicas del metal base; así pues, puede emplearse para recubrir no metales. El metal se evapora en ausencia de presión y se deposita sobre el sustrato en la cámara donde la presión es más baja que la atmosférica. Los metales más convenientes parecen ser los de punto de ebullición bajo, y debido a las limitaciones de la electrodeposición, el aluminio ha tenido mucho interés. Para poder explotar comercialmente un proceso continuo, existen limitaciones en la técnica, como mantener un vacío elevado en los grandes volúmenes que se requieren, la principal ventaja de este recubrimiento es que no es exclusivo, así que se puede realizar en materiales metálicos y no metálicos, cabe mencionar que esta técnica no deja poros en el recubrimiento.

h) Descomposición gaseosa. La inestabilidad de un compuesto gaseoso metálico puede depender de las propiedades termodinámicas de aquel compuesto o de la producción de un gas reductor como el hidrógeno. El cromizado del acero es un proceso útil, análogo a la cementación o nitruración del acero, y se puede realizar en una retorta a 900-1200°C,

aunque generalmente hay que someter el sustrato a un tratamiento térmico prolongado durante el recubrimiento.

i) Reducción de óxidos. La estabilidad de un determinado óxido controla la facilidad con que puede reducirse. Hay algunos óxidos que se descomponen a temperaturas moderadamente bajas; sin embargo, de ordinario se necesita un agente reductor específico. El hidrógeno tiene ventajas como un agente reductor porque es gaseoso y da un producto de oxidación también gaseoso, y cuando un óxido se aplica a una superficie en forma de pasta mezclada con un fundente puede reducirse in situ. Si la temperatura es lo suficientemente alta puede formarse un recubrimiento metálico difundido. El fundente puede evaporarse, puede ser soluble después de la reducción o puede fundirse con el recubrimiento.

j) Cementación. En los procesos de cementación, el elemento aleante difunde a través de la superficie del metal base a partir de una fase gaseosa, sólida/gas o líquida. La nitruración y cementación de los aceros se realiza para endurecer superficialmente las piezas; los metales como el cromo, se usan para obtener una capa superficial resistente a la corrosión. El tratamiento de difusión puede ser de varios días, con temperatura alta, para que el tiempo se reduzca a un valor óptimo.

La mayor parte de la galvanoplastia se realiza ya sea suspendiendo el artículo que se va a recubrir de la barra distribuidora de corriente, o colocando numerosos objetos pequeños en un tambor metálico perforado giratorio.

El control del proceso está dirigido más bien a la composición del baño que al propio producto, condiciones en el baño y condiciones relativas a las exigencias del producto.

El análisis químico del baño se limita generalmente a los principales constituyentes, y la frecuencia de los análisis debe relacionarse con la corriente total consumida. El margen de electrodeposición indica la posible flexibilidad en las variables que actúan, como la temperatura y la densidad de corriente. No es fácil variar la temperatura rápidamente, por lo que ésta se mantendrá constante, dando un margen de densidad de corriente en el cual existen unas condiciones óptimas de depósito. Ésta puede estar influida económicamente por el consumo de potencia, rendimiento de corriente, etc., pero en la práctica la calidad del depósito obtenido es la consideración más importante. Por la resistencia del electrolito, una superficie catódica irregular tendrá diferentes densidades de corriente sobre la superficie.

Capítulo IV.

Técnicas de electrodeposición de cobre sobre acero

Tema IV.1 Sistemas de electrodeposición

Los sistemas de electrodeposición se pueden clasificar en varias clases, como se indica a continuación:

- a) Simples baños ácidos, en los cuales el metal está como catión, solvatado pero no en forma de complejo. Éstos incluyen baños de fosfatos (Cu, Zn, Sn) fluorboratos, sulfamatos, etc.
- b) Baños ácidos complejos, en los cuales el metal está presente como un anión y la deposición catódica tiene lugar por medio de una etapa intermedia o una película catódica.
- c) Baños alcalinos, para metales que forman óxidos anfóteros, y de aquí complejos hidróxilos aniónicos en solución.
- d) Baños alcalinos complejos, siendo los más comunes de todos los baños cianurados.

Un baño de recubrimiento electrolítico consiste de un ánodo y un cátodo en un electrolito, que normalmente es una solución de la sal del metal que se pretende aplicar. En el electrolito, el metal está presente en forma de iones, el flujo de electrones es proporcionado por una fuente externa de corriente directa.

La pieza a recubrir se convierte en cátodo donde se lleva a cabo la reducción de los iones a metal. El ánodo consiste en una barra del metal que se recubrirá. La oxidación se lleva a cabo en el ánodo; cuando fluye la corriente, el ánodo se disuelve. El espesor de la capa del recubrimiento depende del tiempo de permanencia en el baño electrolítico. La capa puede alcanzar un espesor de hasta 100 μm , sin embargo, son mucho más frecuentes las capas más delgadas. Ver en la figura IV.1

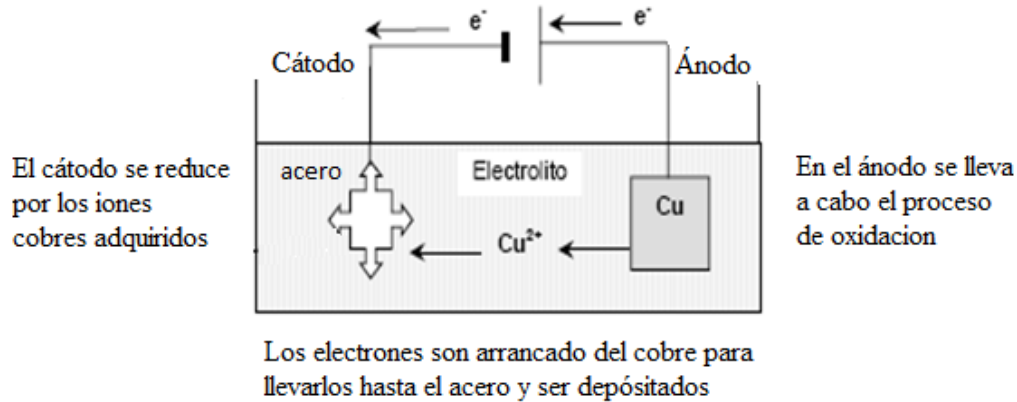


Figura IV.1. Proceso de recubrimiento metálico

Previo a que se deposite la capa metálica, la superficie a cubrir debe estar libre de impurezas, tales como grasa y óxidos. Para ello, se aplican procedimientos de preparación como el pretratamiento mecánico de las superficies como lo es el pulido y los métodos químicos de pretratamiento de superficies: el desengrasado mediante limpiadores alcalinos, hidrocarburos clorados, o por vía electrolítica; así como el decapado. Antes de que una pieza se incorpore al proceso de pulido, desengrasado y recubrimiento, debe realizarse una inspección previa para asegurar que la pieza no presente defectos inaceptables que no se puedan corregir durante el recubrimiento. Estos defectos pueden ser rebabas, bordes, hoyos, moho y otras imperfecciones en la pieza.

Tema IV.2 Cobrizado

Tratamiento electrolítico de color cobre brillante, su cometido es aumentar la conductividad eléctrica en aceros, evita la deposición de proyecciones de soldadura, y como base para posteriores recubrimientos, con pequeños espesores (4-10 μm .). Aplicable sobre los siguientes materiales: hierro, acero, zamac.

Recomendable para los siguientes campos de aplicación:

- Armas
- Construcción de maquinaria
- Útiles y moldes
- Decoración
- Mobiliario

Frecuentemente, el cobre forma la primera capa en un sistema de capas de recubrimiento, puesto que es fácil de depositar en metales y plásticos, ya que presenta una elevada conductividad; además, la capa de cobre es muy resistente, económica de aplicar y forma una buena base adhesiva para otros metales. El cobrizado puede aplicarse a partir de baños alcalinos cianurados y baños con ácido sulfúrico. El cobrizado ácido con sulfatos, generalmente requiere un control más estricto del baño a fin de mantener los parámetros óptimos, sin embargo se evita el uso de cianuro. El baño ácido, también puede utilizarse como primer revestimiento metalizado en plásticos, por su gran ductilidad. En un baño ácido, el sulfato de cobre $CuSO_4$ representa la fuente de iones de cobre que se deposita en la superficie a recubrir. Para este proceso se recomienda sulfato de cobre químicamente puro. El baño de cobre típico contiene sulfato de cobre, ácido sulfúrico, iones de cloruro y aditivos abrillantadores.

El ácido sulfúrico sirve para aumentar la conductividad de la solución y para facilitar la oxidación del ánodo de cobre. El ánodo proporciona los iones de cobre que se incorporan a la solución. El proceso de cobre ácido se realiza a una temperatura entre 20-30 °C. Los electrolitos cúpricos de ácido sulfúrico contienen altas concentraciones de sustancias orgánicas auxiliares, las cuales brindan un mayor control de los parámetros de operación del proceso, para obtener características como: dureza, nivelación y brillo.

Los baños alcalinos de cobre cianurado operan a una temperatura elevada, de 40-60 °C, y contienen cobre en forma de complejos cianurados. Este tipo de baños generalmente contienen cianuro de cobre, hidróxido de sodio y aditivos de brillo. Normalmente, los baños no se cambian, sólo se filtran periódicamente ya sea con filtro de materiales textiles o usando carbón activado para retirar los aditivos o impurezas orgánicas que se han degradado. Por el peligro que representa a la salud humana y al ambiente al usar baños cianurados, deben respetarse normas especiales referentes a la salud ocupacional y seguridad en el trabajo, y la protección al ambiente, tanto durante el cobrizado como en el manejo y el tratamiento de los residuos y las aguas residuales. Los residuos generados en el cobrizado son: residuos de filtración, concentrados provenientes del cambio de baño o del mantenimiento de los tanques (lodos) y enjuagues contaminados por los arrastres de los baños durante el transporte de las piezas de un tanque a otro.

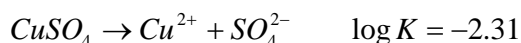
En la tabla IV.1 se menciona las concentraciones que debe tener un baño para cobre ácido y cobre alcalino.

Tabla IV.1. Recomendaciones de adición para baños de cobre².

Baño Ácido		Baño Alcalino	
Compuesto	Composición	Compuesto	Composición
CuSO ₄	250 g/L	CuCN	60 g/L
H ₂ SO ₄	100 g/L	NaOH	20 g/L
Cl ⁻	Menor 1 g/L	Aditivos	10 g/L
Aditivos	6 g/L		

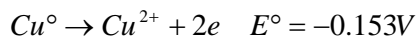
Información proporcionada por SurTec Internacional

Las reacciones involucradas en este tipo de recubrimiento para el cobre ácido son básicamente de óxido-reducción y se muestran a continuación, pero primero el sulfato de cobre se disocia en el baño:



En los baños de cobre ácido, la concentración de iones Cu²⁺ va disminuyendo conforme aumenta el pH; es por ello que este tipo de baños se opera a pH de 4.5 en donde la concentración de iones Cu²⁺ es casi constante. Los otros tipos de complejos formados, que pueden afectar en cierta medida el recubrimiento, se hacen reaccionar en algunos casos con los compuestos que constituyen los aditivos para lograr de esta forma darle brillo y uniformidad al recubrimiento.

La oxidación de Cu⁰ a Cu²⁺ en el ánodo



Posteriormente los iones Cu²⁺ se desplazan en la solución para finalmente llegar al cátodo donde se reducen en la superficie catódica en Cu⁰ metálico.



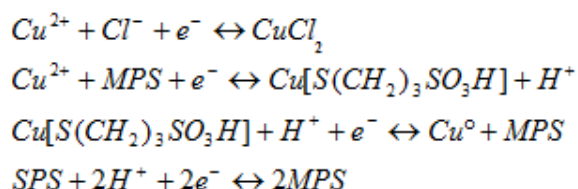
Este proceso se lleva a cabo a un pH de 4.5 y con una corriente de 1-8 Amp/ dm²

Otro aspecto importante a considerar es que los aditivos para cobre, que generalmente pueden estar constituidos de polietilenglicol (PEG), ácido mercaptopropano sulfónico

² Electrodepositos de cobre y de níquel, Emmanuel Ballesteros Barrera, ed. UAM.

(MPS) y disulfopropil disulfuro (SPS), pueden facilitar el recubrimiento de cobre debido a que pueden interactuar con los iones de Cu^{2+} para agilizar su reducción a Cu^0 . Además, los aditivos reaccionan con algunos complejos que aunque se encuentran en proporciones pequeñas pueden afectar en gran medida el recubrimiento.

Las reacciones implicadas son las siguientes:



Tema IV.3 Leyes de Faraday de la electrólisis

La electrólisis es la descomposición que sufren algunos compuestos químicos cuando a través de ellos pasa corriente eléctrica. Tal vez el experimento de laboratorio más sencillo para ilustrar el efecto sea la electrólisis del agua (un compuesto de hidrógeno y oxígeno). Haciendo pasar una corriente continua a través de agua acidulada (agua con algunas gotas de ácido, para que conduzca la corriente eléctrica) en los electrodos (los contactos eléctricos) se forman burbujas de oxígeno e hidrógeno

Las leyes que enunció Faraday fueron las siguientes:

1) El peso de una sustancia depositada es proporcional a la intensidad de la corriente (o sea, al número de electrones por segundo) y al tiempo que ésta circula.

$$m = (P I t) / (96500 n)$$

Donde:

m = masa en gramos que se han depositado

P = peso atómico del elemento

n = número de electrones intercambiados

I = intensidad de la corriente en amperios

t = tiempo en segundos

96500 es el factor de equivalencia entre el Faraday y el Culombio. 1 F= 96500 C

Una corriente de gran intensidad que circula a través del electrolito durante un tiempo depositará más sustancia que una corriente débil que actúe durante el mismo tiempo.

Cuando se realiza, por ejemplo, la electrólisis de una solución de sulfato cúprico (CuSO_4) sucede lo siguiente (fig. IV.3):

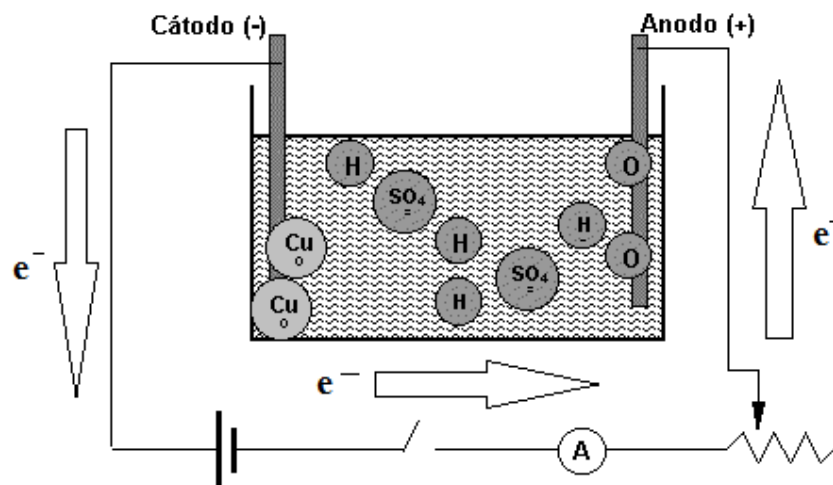
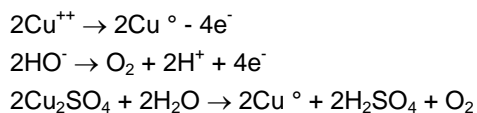


Figura IV.3 celda electrolítica que contiene sulfato de cobre

Al aplicar una diferencia de potencial a los electrodos, el ion cobre se mueve hacia el cátodo, adquiere dos electrones y se deposita en el electrodo como elemento cobre. El ion sulfato, al descargarse en el electrodo positivo, es inestable y se combina con el agua de la disolución formando ácido sulfúrico y oxígeno.



Cuando la corriente es muy grande se deposita más cobre, pues más electrones han circulado permitiendo que iones cobre (Cu^{++}) se conviertan en elemento cobre (Cu°).

La segunda ley nos dice:

2) El peso de una sustancia depositada durante la electrólisis es proporcional al peso equivalente de la sustancia.

La segunda parte dice que cuando la misma corriente circula durante el mismo tiempo, las cantidades de sustancia depositadas dependerán de su peso equivalente. El peso equivalente de una sustancia es el número de unidades de peso de una sustancia que se combinarán con una unidad de peso de hidrógeno. En una molécula de agua, dos moléculas de hidrógeno, cada una de las cuales pesa una unidad, se combinan con un átomo de oxígeno, que pesa dieciseis unidades. De modo que si dos unidades de

hidrógeno se combinan con dieciseis unidades de oxígeno, una unidad de hidrógeno lo hará con ocho unidades de oxígeno. El peso equivalente del oxígeno es, entonces, ocho, de manera que durante la electrólisis del agua se libera, en peso, ocho veces más oxígeno que hidrógeno. Cuanto mayor sea el peso equivalente de un elemento, mayor será el peso de él, que se depositará durante la electrólisis. Este fenómeno se aplica actualmente en la galvanoplastia y la extracción y purificación de algunos metales.

Capítulo V.

Desarrollo experimental

Tema V.1 Desarrollo experimental

Se trata de fabricar una celda electrolítica con una fuente externa de alimentación eléctrica y de observar en ella la electrodeposición de una capa de cobre sobre un objeto de acero de bajo carbono, que actúa como cátodo de la celda.

Las reacciones de corrosión son de naturaleza electroquímica, ya que aplican transferencia de electrones entre el metal que sufre el ataque (que actúa como dador electrónico o ánodo) y una segunda sustancia que recibe tales electrones, y que por tanto se reduce, actuando como oxidante de la reducción redox.

Muchas partes metálicas se protegen de la corrosión por electrodeposición, para producir una fina capa protectora de metal. En este proceso, la parte que va a hacer recubierta constituye el cátodo de una celda electrolítica. El electrolito es una sal que contiene cationes del metal de recubrimiento. Se aplica una corriente continua por medio de una fuente de alimentación, tanto a la parte que va ser recubierta como al otro electrodo. Un ejemplo de deposición en varias capas es el cromado.

En una celda electrolítica se produce una reacción redox no espontánea suministrando energía eléctrica al sistema por medio de una batería o una fuente de alimentación. La batería actúa como una bomba que suministra electrones, arrancándolos del ánodo y empujándolos a la superficie del cátodo. Dentro de la celda, para que se mantenga la electronegatividad, debe ocurrir un proceso que consuma electrones en el cátodo y que los genere en el ánodo. Este proceso es una reducción redox.

En el cátodo tendrá lugar la reducción de un ion al aceptar éste los electrones remitidos desde el ánodo.

Los iones positivos (cationes) se dirigirán al polo negativo, llamado cátodo. En el ánodo se generan electrones debido a la oxidación de un metal u otra sustancia. Los electrones son enviados al otro electrodo por la batería. El ánodo pierde por tanto, su carga negativa y por esa razón es el polo positivo.

El metal sobre el que se va a producir el depósito de cobre se coloca como cátodo; en nuestro caso una laminilla de acero de bajo carbono. El electrolito es una disolución de sulfato de cobre (CuSO_4) que aporta Cu^{++} . Por último, el ánodo es un hilo de cobre a cuyos átomos la batería arranca electrones, cargado positivamente este electrodo y generando nuevos iones de cobre

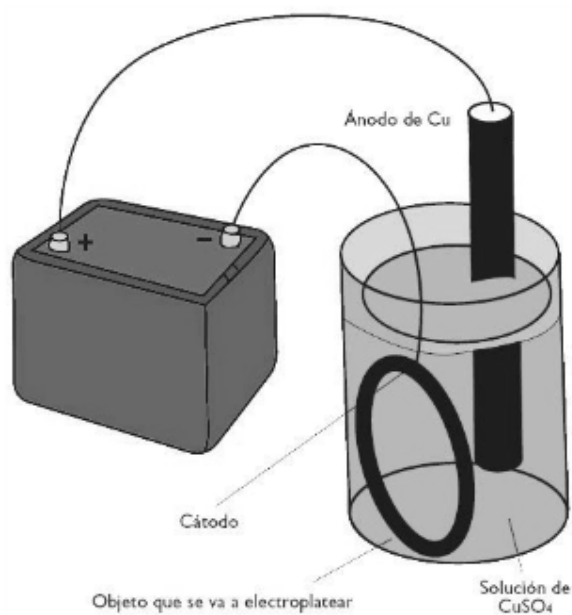
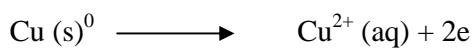
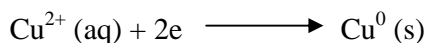


Figura V.1 Esquema de la celda electrolítica

La batería, al arrancar electrones del cobre anódico, ocasiona oxidación de este metal:



Los electrones llegarán al cátodo impulsados por la batería. Una vez ahí, reducirán a los iones cúpricos presentes en el electrolito.



De esta manera, en el cátodo se va formando un precipitado de cobre que se deposita como una fina capa de color rojizo en la superficie del acero. Existe además una relación simple entre la cantidad de electricidad que pasa a través de una celda electrolítica y la cantidad de sustancia depositada en el cátodo. Ambas cantidades son directamente proporcionales (ley de electrolisis de Faraday).

Tema V.2 Características del ánodo

Los ánodos solubles se prefieren casi siempre en electrodeposición, y el comportamiento del ánodo puede desempeñar un papel importante en el funcionamiento correcto del proceso, ya sea en el rendimiento de corriente, poder de penetración o en el mantenimiento de la composición de la solución. Ánodos solubles ideales deben reunir las siguientes características:

- Que no tengan asperezas y que se disuelvan por igual bajo la influencia sólo de la corriente.
- Formación mínima de lodos.
- Disolución con un alto rendimiento de corriente anódica.
- Alta corriente anódica; esto se consigue teniendo el ánodo de una gran área para una cantidad de materia determinada.
- Máxima pureza para un costo razonable.

Tema V.3 Consideración de parámetros para el depósito

El contenido de la tabla V.1 muestra los parámetros de lijados que se consideraron para lograr un buen depósito.

Se consideraron 4 clases de lija, las cuales son: tipo grueso, mediano, fino y pulido grueso. Se tomaron en cuenta estas lijas ya que generan distintos acabados superficiales, los cuales fueron desde un acabado grueso hasta llegar a un pulido y de esta manera obtener diferentes superficies para generar el depósito.

Tabla V.1 Parámetros de lijado

Número de lija	Denominación de la lija	Marca	Tamaño de partícula	Tipo de desbaste
Lija 1	No. 60	FANDELI	265 micrones	Grueso
Lija 2	No. 100	FANDELI	141 micrones	Mediano
Lija 3	No. 220	FANDELI	65 micrones	Fino
Lija 4	No. 320	FANDELI	35 micrones	Pulido grueso

La tabla V.2 muestra los parámetros que se consideraron para las sustancias utilizadas.

Tabla V.2 Parámetros de las sustancias

Número de sustancia	Soluto	Solvente	Cantidad	Concentración molar de CuSO_4
Sustancia 1	Sulfato de cobre	Agua destilada	250 ml	0.25
Sustancia 2	Sulfato de cobre	Agua destilada	250 ml	0.5
Sustancia 3	Sulfato de cobre	Agua destilada	250 ml	0.7
Sustancia 4	Sulfato de cobre	Agua destilada	250 ml	1

La figura V.2 muestra la secuencia de pasos que se siguieron para poder generar un buen depósito

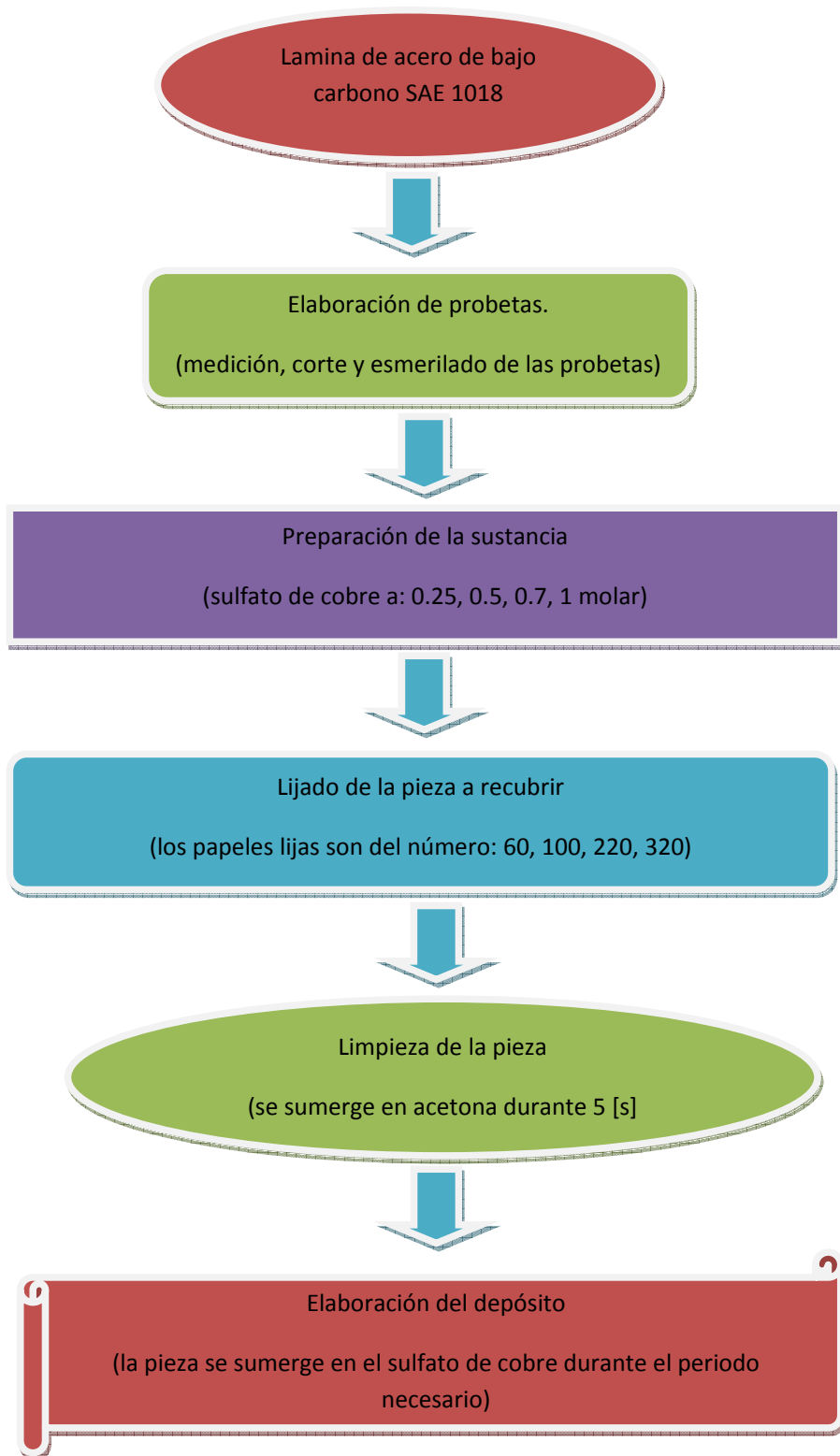


Figura V.2 Muestra la secuencia a seguir para conseguir un buen depósito.

Capítulo VI

Metodología para la obtención del recubrimiento

Tema VI.1 Preparación de la superficie

Se consideró cuatro etapas:

a) La preparación por abrasivos solo es necesaria, en general para piezas de fundición y objetos que se han de recubrir nuevamente donde hay que quitar por completo el recubrimiento original. El fresado y el desbaste pueden ser necesarios en algunos casos y como tratamiento final, un chorreado con granalla; este último es particularmente valioso para limpiar hendiduras y superficies poco lisas.

b) La limpieza está asociada generalmente con contaminantes sólidos, tales como polvo, limaduras, etc., o con aceites o grasas. La grasa se quita en especial con disolventes orgánicos o con un desengrase al vapor (por ejemplo tetracloruro de carbono, tricloroetileno, percloroetileno), y las capas delgadas de grasa, mediante tratamientos catódicos alcalinos, en los cuales la combinación álcalis, jabones y el desprendimiento de hidrógeno produce una completa saponificación de la película de aceite que flota en el baño.

c) El decapado ácido es necesario para quitar las capas de óxidos superficiales, sulfuros, etc., y asegurar una perfecta adherencia entre metal/metal base durante el recubrimiento, y puede que sean necesarios procesos especiales para quitar los recubrimientos metálicos anteriores. Las capas delgadas pueden suprimirse por tratamientos electrolíticos y frecuentemente anódicos, seguidos de catódicos, alternando las polaridades a fin de que se eliminen por completo.

El ácido clorhídrico es un decapante rápido a temperatura ambiente, pero el ácido sulfúrico es más versátil, ya que se puede usar a mayores temperaturas y es más barato.

d) El acabado del sustrato puede realizarse por ataque químico o pulido. Al anodizado le precede frecuentemente un electropulido, y el ataque superficial genera puntos de anclaje para mejora la adhesión.

Tema VI.2 Preparación de la pieza.

Para el proceso de cobrizado electrolítico es necesario la preparación de la superficie con la que se va a trabajar.

Todas las imperfecciones en la superficie del objeto que se planea cobrizar van a formar parte de la superficie final y, en la mayoría de los casos, no se van a disimular, sino que al contrario, van a resultar exageradas.

En las partes dónde a la superficie le quede grasa u óxido, el material no se adherirá bien. La superficie resultará defectuosa desde el principio y, con el tiempo el recubrimiento se desprenderá.

Los pasos para la preparación de la pieza son:

Pulido:

El proceso de pulido puede incluir varias fases, como son el esmerilado, el lijado y el pulido.

- El esmerilado se usa para quitar rápidamente material sobrante, por lo general se emplea para quitar rebordes que son resultado del proceso de fundido o soldado de la pieza.
- El lijado tiene el propósito de borrar la huella dejada por el esmeril y preparar la superficie para un terminado cada vez más terso.
- Además se puede recurrir a un lavado posterior al lijado con un poco de detergente para evitar los residuos de material removido.

Desengrase:

El paso siguiente, después de que la superficie ha quedado con la textura que se requiere, es quitar todo el polvo, el aceite y la grasa.

El baño de desengrase, en este caso, se realizó introduciendo la placa en percloroetileno. Se dejó sumergida por 1 minuto y en seguida se lavó con agua destilada.

Decapado:

En esta etapa, se prepara una solución de ácido sulfúrico al 10% disuelto en agua, el baño ácido neutraliza la película alcalina que deja el baño desengrasante, quita los residuos de óxido, muchas veces invisibles, y prepara la pieza para el baño de metal, para este trabajo no se utilizó ningún tipo de inhibidor.

La pieza se sumerge, aproximadamente 2 minutos en la solución.

Después de estos pasos la pieza está lista para el proceso de cobrizado.

Tema VI.3 Preparación de la sustancia

Para la preparación de la sustancia es necesario saber con claridad la cantidad de soluto en la solución.

Los siguientes pasos son para prepara una solución de sulfato de cobre de 0.7 molar

- Primero se debe tomar un vasos de precipitado y verter 1.5 litros de agua destilada.
- Una vez hecho lo anterior se agregan 224 gramos de sulfato de cobre.
- Aforar la solución al volumen requerido (2L)
- Con el sulfato de cobre y el agua destilada en el vaso, es necesario una buena agitación para tener buena homogeneidad y para esto se necesita un agitador magnético.
- Es necesario dejar la solución hasta conseguir su total homogeneidad.

Tema VI.4 Metodología para la obtención del recubrimiento con una fuente de alimentación externa.

A continuación se listarán los pasos sugeridos para obtener el recubrimiento:

1. Medir y cortar la pieza a recubrir.
2. Una vez cortada la pieza es necesario remover todos los bordes filosos, y para esto se puede utilizar un esmeril.
3. Para poder borrar las huellas dejadas por el esmeril, nos podemos ayudar de un lijado, aquí es necesario saber el tipo de acabado al cual se quiere llegar, para poder determinar la lija adecuada para lograr este tipo de acabado.
4. A llegar al acabado superficial deseado, es necesario desengrasar nuestro material y para esto, el material es sumergido en acetona ($\text{CH}_3(\text{CO})\text{CH}_3$) y limpiado con una franela limpia (se utilizo acetona porque es barata y muy fácil de encontrar en el mercado).

5. Se monta el dispositivo mencionado en el capítulo anterior, conectando el cátodo a nuestra placa de acero y a nuestro ánodo el cobre electrolítico.
6. Se sumergen las placas de cobre y acero en el sulfato de cobre y se enciende la fuente de alimentación.
7. La corriente fue de $1.9 \text{ [mA}\cdot\text{cm}^2]$ y se determino por un concepto llamado “corriente límite” el cual se explicará en el capítulo VII.
8. La placa se deja por un lapso de 7 a 12 minutos y posteriormente se retira de la solución, (los minutos necesarios con exactitud se determinarán en los capítulos VII y VIII).
9. Al retirar la placa se notará un color rojizo indicador de que el cobre se ha depositado.
10. Finalmente la placa se debe lavar con agua corriente, para retirar el exceso de cobre.

Tema VI.5 Metodología para la obtención de recubrimiento sin fuente de alimentación

A continuación se enlistarán los pasos sugeridos para obtener el recubrimiento:

1. Medir y cortar la pieza a recubrir.
2. Una vez cortada la pieza es necesario remover todos los bordes filosos, y para esto se puede utilizar un esmeril.
3. Para poder borrar las huellas dejadas por el esmeril, nos podemos ayudar de un lijado, aquí es necesario saber el tipo de acabado al cual se quiere llegar, para poder determinar la lija adecuada para lograr esté tipo de acabado.
4. Tras llegar al acabado superficial deseado, es necesario desengrasar el material y para esto, es sumergido en acetona ($\text{CH}_3(\text{CO})\text{CH}_3$) y limpiado con una franela limpia.
5. Una vez desengrasada la pieza se sumerge en el sulfato de cobre por un lapso de 7 a 12 segundos (este tiempo es crucial para poder lograr de manera adecuada el

recubrimiento, estos minutos necesarios se determinaran en los capítulos VII y VIII).

6. Al retirar la placa se notará un color rojizo indicador de que el cobre se ha depositado.
7. Finalmente la placa se debe lavar con agua corriente, para retirar el exceso de cobre.

A continuación se representará un diagrama de flujo con los pasos mencionados con anterioridad

Paso No.1: Medir y cortar la pieza.



Paso No. 2: Pasada por el esmeril.



Paso No. 4: Preparación del sulfato de cobre.



Paso No. 3: lijado.



Paso No. 5: Limpieza de la pieza en acetona.



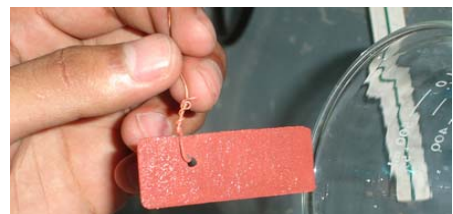
Paso No. 6: Sumergir la pieza en el sulfato de cobre.



Paso No. 8: Pieza final.



Paso No. 7: Sacar la pieza y lavarla con agua de la llave.



Capítulo VII.

Optimización de parámetros.

Tema VII.1 Determinación de la corriente límite.

Se diseñó un experimento para determinar la corriente límite del acero SAE 1018.

Este experimento determina la corriente inicial para realizar el depósito de cobre sobre el acero, determina cual es el máximo de corriente que puede atravesar por la celda electrolítica para mantener estable el recubrimiento.

Primero se preparó la sustancia de sulfato de cobre a 0.7 molar, esto es de la siguiente manera, en un vaso de precipitado se vierte 1 litro de agua destilada, posterior a esto se hicieron los siguientes cálculos.

Recordando la fórmula de molaridad $1M=P/1L$, recordando la fórmula del sulfato de cobre $CuSO_4$ y sabiendo que el peso molecular del cobre es de 64 (g), del oxígeno 16 (g) y del azufre 32 (g), se obtiene un peso molecular del sulfato de cobre de 160 (g).

Entonces para uno molar se tiene $1 M = 160 / 1000 \text{ ml}$. Entonces para 0.7 M se necesitan 112 gramos de sulfato de cobre.

Una vez hecho lo anterior se vierten los 112 gramos a los 1000 ml, es necesario conseguir una buena homogeneidad por lo cual hay que dejar agitando la sustancia por cerca de una hora.

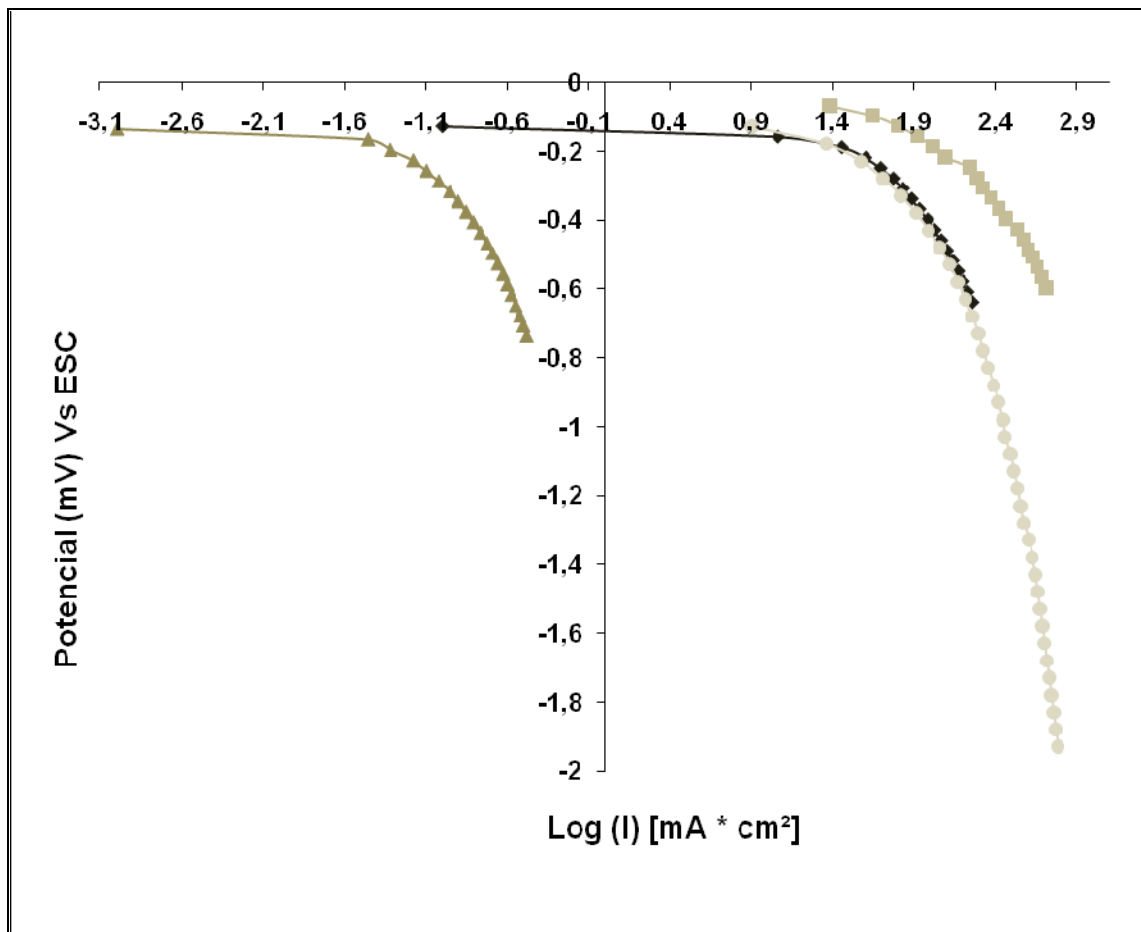
El armado de la celda electrolítica es similar al explicado en el tema V.1, es necesario una fuente de corriente la cual se conectan en el cátodo y el ánodo, en este sistema se necesitó un tercer electrodo que fue el que nos registró la corriente, este electrodo de referencia se llama electrodo saturado de Calome y va conectado al ánodo, también para este experimento se utilizó un ánodo de grafito.

El conectado fue el siguiente, el cátodo se conectó a la laminilla de acero, se utilizó un cable con dos terminales de los cuales, el positivo se conectó al electrodo medidor y el negativo se conectó al ánodo de grafito

Una vez hecho todo lo anterior es necesario y muy importante preparar el objeto a recubrir, en este caso fue una laminilla de acero SAE 1018, con dimensiones de 2.5 centímetros de ancho por 3 [cm] de largo y un espesor de 0.5 centímetros, para este experimento se utilizó una lija del número 100.

El procedimiento fue el siguiente: una vez conectado el sistema se partió de una corriente de reposo, esta corriente es independiente de cada material, posterior a esto se aumentan 0.3 volts y se toma la lectura de la corriente, después se aumentan otros 0.3 (V) y se toma la medida de la corriente, este proceso se repite las veces que sea necesario hasta poder determinar la corriente límite, la cual es un brinco brusco en la tendencia de los resultados, es destacable mencionar que se trabajó en la zona catódica.

Esta prueba se hizo a cuatro materiales distintos, 3 aceros 1018 y un acero inoxidable y los resultados se representan en la gráfica VII.1.



En la gráfica VII.1 las tres líneas del lado derecho, la serie del cuadrado, la circular y la rómbica corresponden a los aceros 1018, como se observa tiene un comportamiento muy similar, la serie triagular corresponde al acero inoxidable.

Los resultados de este experimento fueron que en los aceros 1018 desde el inicio del ciclo ocurre el depósito de cobre, pero el depósito presentó **baja adherencia**, con solo el roce de la mano el cobre se desprende, lo cual se presenta en todas las pruebas

realizadas por este procedimiento, para el acero inoxidable el depósito se empieza a dar hasta una corriente de -0.4 (A), pero en este caso sí existe adherencia del cobre sobre el acero inoxidable.

Si el depósito fuera llevado a cabo por un mecanismo difusivo el cobre no pudiese ser adherido por la microestructura que presentan los aceros de bajo carbono, la cual es austenítica con una microestructura cúbica centrada en las caras, en la cual existe solo un 26% de espacios libres. Comparando el tamaño de los átomos del cobre y del hierro nos damos cuenta de que son muy similares, con lo cual es muy difícil que el cobre entre en los huecos, que son muy pocos, y quedarse depositado ahí, tomando estos dos factores, el tamaño y la microestructura podemos llegar a una explicación del efecto de no adherencia del cobre sobre acero 1018.

En estructuras martensíticas con microestructuras cúbicas centradas en el cuerpo con un espacio libre del 32 %, como la de los aceros inoxidables, hay más posibilidades de que el cobre encuentre más espacios libres en donde quedar depositados.

En este trabajo, la adherencia entre el Cu y el sustrato de acero es muy poca, ya que en el acero no existe muchos puntos de anclaje en los cuales el cobre pueda quedar adherido, por lo cual es necesario darle al acero un acabado superficial más rugoso y así crear más puntos de anclaje.

Tema VII.2 Determinación del parámetro de lijado y acabado superficial.

Al estudiar la gráfica VII.1 se observó que desde los primeros momentos existe depósito, con lo cual se propuso trabajar con corrientes muy pequeñas para poder llegar a una adherencia óptima, para esto se diseñó un nuevo procedimiento el cual consiste en preparar sulfato de cobre de la misma manera que se mencionó en el tema pasado, a una concentración de 0.7 M.

Para poder determinar los parámetros de lijado y con ello el acabado superficial se escogieron 4 lijas de tamaños diferentes las cuales fueron de la marca FANDELI y sus denominaciones fueron las siguientes:

- Lija del número 60 con tamaño de partícula de 265 micrones (grueso de desbaste pesado)
- Lija del número 100 con tamaño de partícula de 141 micrones (mediano de desbaste intermedio)
- Lija del número 220 con tamaño de partícula de 65 micrones (muy fino de acabado)
- Lija del número 320 con tamaño de partícula de 35 micrones (muy fino de pulido)

Una vez el sulfato de cobre en el vaso de precipitado con una buena homogeneidad, se pasa a la preparación del objeto para esto se hace lo siguiente.

1. Se debe eliminar todos los bordes filosos y rebabas en el material a recubrir.
2. Se lija perfectamente el espécimen, con la lija correspondiente, hasta dejar una superficie homogénea.
3. Posterior al lijado se tiene que eliminar todos los rastros de grasa en el espécimen, por lo cual se sumerge por un periodo de 5 segundos en acetona.
4. Se seca la acetona y se seca con un trapo limpio (se debe utilizar guantes para evitar contaminar el espécimen) y se sumerge en el sulfato de cobre.

Los periodos de tiempo que se tomaron para el recubrimiento fueron 1, 3, 5, 10 y 15 segundos, el último depende del tamaño de la lija ya que con cada lija cambia el último tiempo, que es en donde se empiezan a presentar problemas de adherencia.

La masa depositada se calculó de la siguiente manera: con ayuda de una balanza analítica se toma el peso de la pieza después de sacarla de la acetona, posteriormente se toma el peso de la pieza ya con el depósito de cobre y haciendo una simple resta de los pesos se obtiene la masa depositada en la pieza.

Los resultados de esta prueba se muestran en las tablas VII.1, VII.2 y VII.3:

Tabla VII.1 Lija No. 60

Tiempo (s)	Densidad de corriente (mA * cm ²)	Masa depositada (g)
1	0.05	0.0001
3	0.02	0.00015
5	0.02	0.0002
10	0.06	0.00012
13	0.03	0.0008
20	0.01	0.0004
30	0	0

Tabla VII.2 Lija No.100

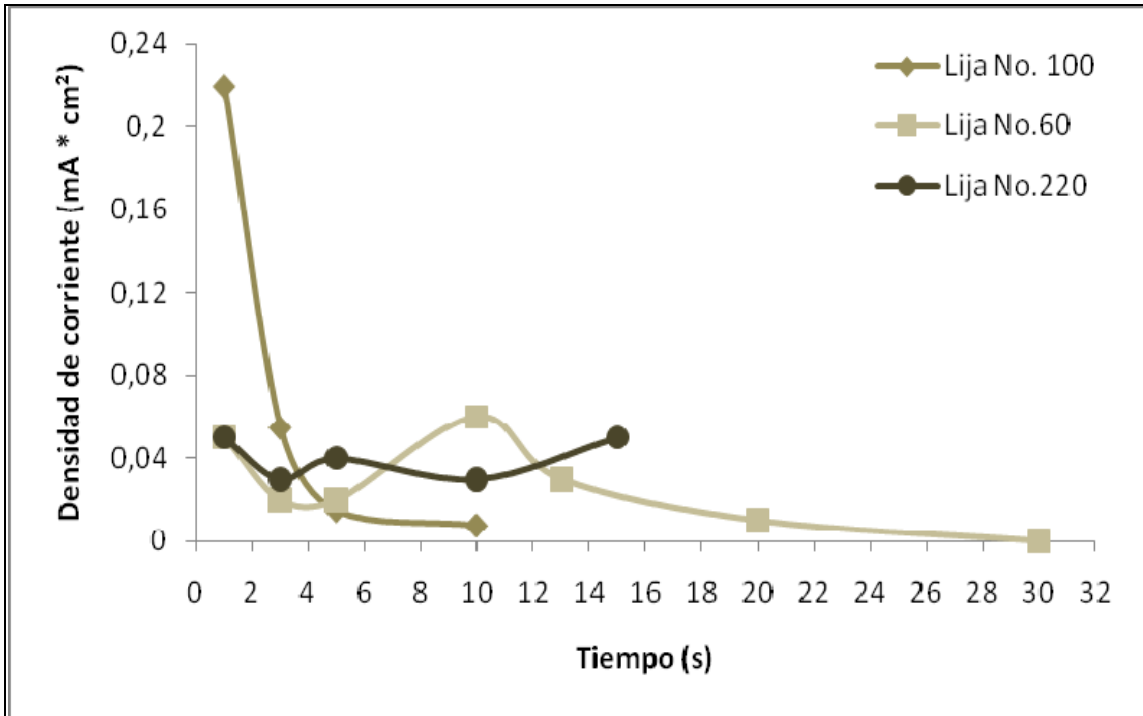
Tiempo (s)	Densidad de corriente (mA * cm ²)	Masa depositada (g)
1	0.22	0.00045
3	0.055	0.00065
5	0.015	0.00075
10	0.0079	0.00077
15	0	0

Tabla VII.3 Lija No.220

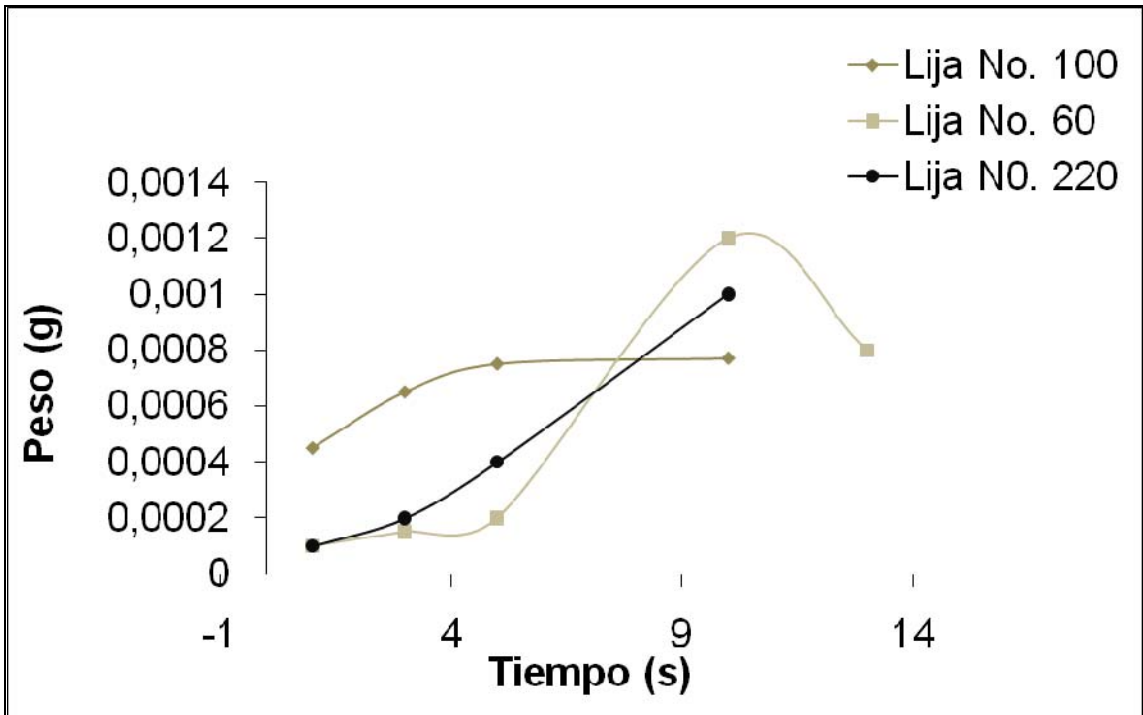
Tiempo (s)	Densidad de corriente (mA * cm ²)	Masa depositada (g)
1	0.05	0.0001
3	0.03	0.0002
5	0.04	0.0004
10	0.03	0.001
15	0	0

Para la lija del número 220 se presentaron problemas en todos los tiempos así que con esta lija no hay adherencia.

Los resultados están representados en la gráfica VII.2 y VII.3



La gráfica VII.2 representa la relación corriente peso a una sustancia de 0.7 M.



Gráfica VII.3 en esta gráfica se observa que los mejores tiempos para lograr buenos depósitos son en el intervalo de 7 y 8 segundos.

Las lijas con las cuales se trabajaron bien fueron las del número 60, 100, 220 y 320, pero con esta última se tuvieron algunos problemas de adherencia, se hicieron pruebas con lijas del número 420 pero no se obtuvieron buenos resultados, así que las lijas que se tomaran para las siguientes pruebas serán las de los números 60, 100, 220 y 320.

Tema VII.3 Determinación de los tiempos óptimos dependiendo de la concentración de la sustancia.

Para esta etapa se hizo lo mismo que el tema VII.2, solo que aquí se prepararon diferentes concentraciones de sustancias, las cuales fueron 0.25, 0.5, 0.7 y 1 Molar, con cada una de estas sustancias se ocuparon los cuatro tipos de lijas mencionadas anteriormente.

La manera en que se calcularon las concentraciones fueron las siguientes:

Se tiene la relación pasada que fue para 1M = 160 (g) / 1000 ml , ahora se quiere tener la misma concentración pero en 250 ml entonces haciendo un regla de tres se tiene 1M = 40 (g) / 250 ml, solo basta hacer los porcentajes de 0.25, 0.5 y 0.7, y los resultados fueron para 0.25 se tiene 10 (g), para 0.5 se tiene 20 (g), y para 0.7 se obtuvo 28 (g).

Los resultados para la primera sustancia que fue la de **0.25 M** fueron los siguientes:

Tabla VII.4 Lija No. 60

Tiempo (s)	Densidad de corriente (mA * cm ²)	Masa depositada (g)
1	0	0
3	0	0
5	0.016	0.0002
7	0.022	0.0004
8	0.02	0.0004
10	0.017	0.00045
15	0.016	0.0006
20	0.002	0.0001
25	0	0

Tabla VII.5 Lija No. 100

Tiempo (s)	Densidad de corriente (mA * cm ²)	Masa depositada (g)
1	0	0
3	0	0
5	0.008	0.0001
7	0.02	0.00035
8	0.02	0.00045
10	0.02	0.0005
15	0.005	0.0002
20	0	0

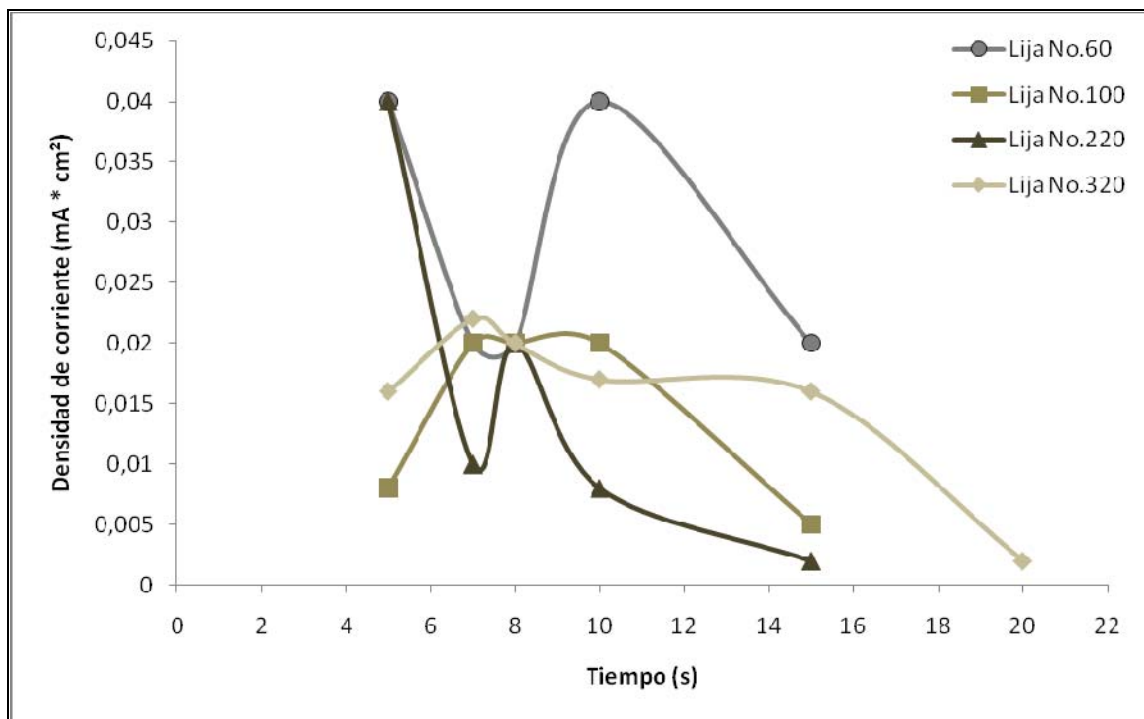
Tabla VII.6 Lija No. 220

Tiempo (s)	Densidad de corriente (mA * cm ²)	Masa depositada (g)
1	0	0
3	0	0
5	0.04	0.0001
7	0.01	0.00035
8	0.02	0.0004
10	0.008	0.00015
15	0.002	0.0001
20	0	0

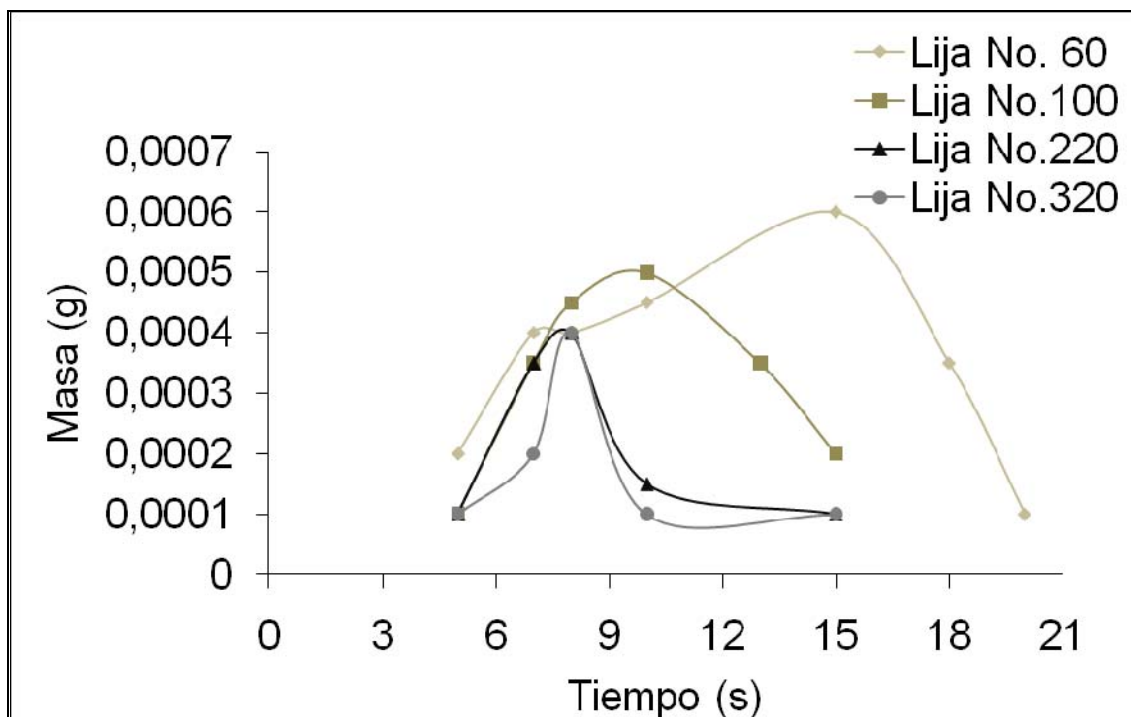
Tabla VII.7 Lija No. 320

Tiempo (s)	Densidad de corriente (mA * cm ²)	Masa depositada (g)
1	0	0
3	0	0
5	0.04	0.0001
7	0.02	0.0002
8	0.02	0.0004
10	0.04	0.0001
15	0.02	0.0001
20	0	0

Las gráficas VII.4 y VII.5 representan los resultados obtenidos.



Gráfica VII.4 donde se encuentra la tendencia de la corriente a una sustancia de 0.25 M.



Gráfica VII.5 donde se encuentran vinculados los mejores depósitos para esta sustancia de 0.25 molar.

Para la lija No.60 (rombica), la adherencia empieza a los 4-5 [s], el mejor depósito visto para esta sustancia se da en el intervalo de 12-14 [s], posterior a los 19 segundos se empiezan a presentar problemas de adherencia, una vez llegados a los 23 segundos deja de adherirse el cobre.

Para la lija No. 100 (cuadrática), se contó con adherencia a partir de los 5 [s] ya que antes de este tiempo no hay adherencia, se observa que el máximo depósito se encuentra entre 9 a 11 segundos y posterior a los 15 segundos deja de existir el depósito.

Para la lija No. 220 (triangular), la adherencia empieza a partir de 5 [s] pero con imperfecciones, el mejor depósito se da a los 7-8 [s], la adherencia tiene problemas a partir de 15 y a los 18 deja de haber adherencia.

Para la lija No. 320 (circular), es difícil seleccionar el intervalo para el mejor depósito ya que en la mayoría de los tiempos existen problemas de adherencia, pero el mejor depósito logrado para esta lija es en 7-9 segundos.

Los resultados para la sustancia de **concentración 0.5 M** fueron los siguientes:

Tabla VII.8 Lija No. 60

Tiempo (s)	Densidad de corriente (mA * cm ²)	Masa depositada (g)
1	0.08	0.0002
3	0.04	0.0003
5	0.04	0.0005
10	0.008	0.0002
15	0	0

Tabla VII.9 Lija No.100

Tiempo (s)	Densidad de corriente (mA * cm ²)	Masa depositada (g)
1	0.04	0.0001
3	0.02	0.0002
5	0.03	0.0004
10	0.01	0.0004
15	0.01	0.0005
20	0.006	0.0003
25	0.001	0.0001
30	0	0

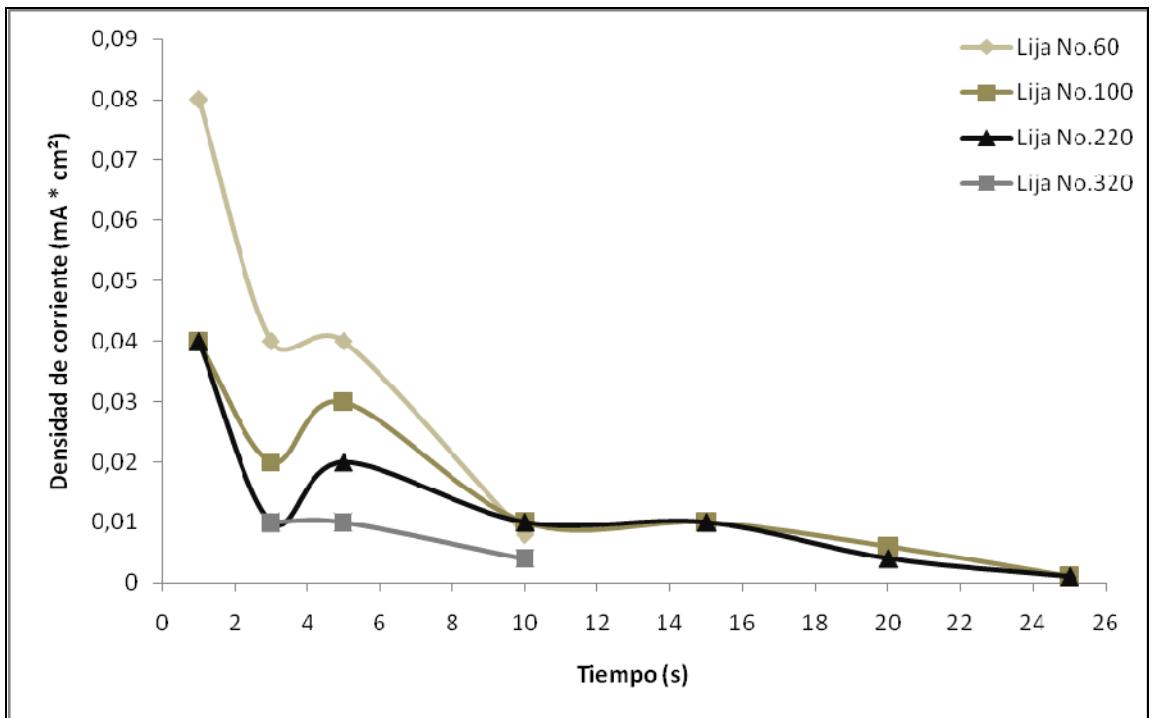
Tabla VII.10 Lija No.220

Tiempo (s)	Densidad de corriente (mA * cm ²)	Masa depositada (g)
1	0.04	0.0001
3	0.01	0.0001
5	0.02	0.0003
10	0.01	0.0004
15	0.01	0.0005
20	0.004	0.0002
25	0.001	0.0001
30	0	0

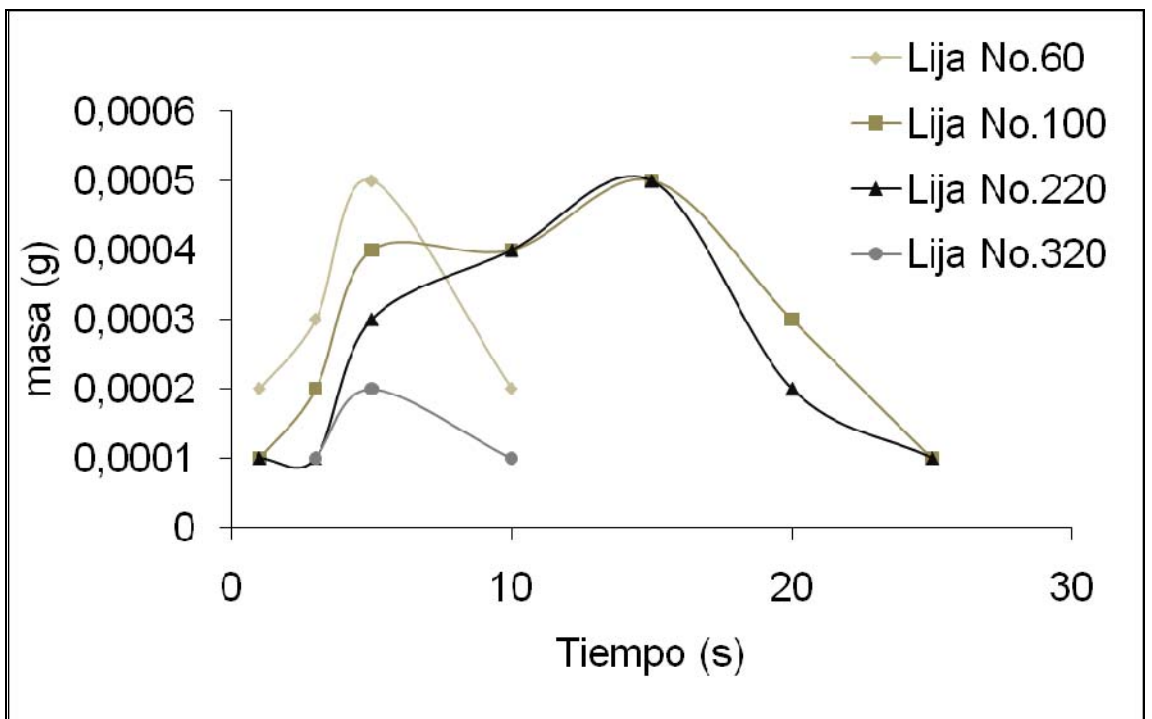
Tabla VII.11 Lija No.320

Tiempo (s)	Densidad de corriente (mA * cm ²)	Masa depositada (g)
1	0	0
3	0.01	0.0001
5	0.01	0.0002
10	0.004	0.0001
15	0	0

Las gráficas VII.6 y VII.7 representan los resultados obtenidos.



Gráfica VII.6 donde se encuentra la tendencia de la corriente a una sustancia de 0.5 M.



Gráfica VII.7 donde se encuentra vinculados los mejores depósitos para esta sustancia de 0.5 molar.

Para la lija No. 60 (r6mbica), existen dep6sitos hasta los 15 segundos, despu3s de esto deja de existir la adherencia, el mejor dep6sito de encuentra 7 y 8 segundos.

Para la lija No. 100 (cuadrada), hasta el segundo 25 se encuentran ligeros problemas de adherencia, posterior a este segundo deja de existir la adherencia, el mejor dep6sito se encuentra entre 10 y 15 segundos

Para la lija No. 220 (triangular), en los segundos 1-3 se encuentran problemas de adherencia, el mejor dep6sito se encuentra entre los 14-16 segundos, a los 25 segundos se encuentran problemas de adherencia, para pasar a 30 segundos en donde deja de existir el dep6sito.

Para la lija No. 320 (circular), con este tipo de lija es un poco dif3cil de trabajar ya que en todos los puntos se encuentran problemas de adherencia, el mejor dep6sito ocurri3 en 5 segundos.

Los resultados para la sustancia de **concentraci3n 0.7 M** fueron los siguientes:

Tabla VII.12 Lija No.60

Tiempo (s)	Densidad de corriente (mA * cm ²)	Masa depositada (g)
1	0	0
3	0.01	0.0001
5	0.01	0.0002
10	0.01	0.0004
15	0.01	0.0004
20	0.004	0.0002
25	0.001	0.0001
30	0	0

Tabla VII.13 lija No.100

Tiempo (s)	Densidad de corriente (mA * cm ²)	Masa depositada (g)
1	0	0
3	0.01	0.0001
5	0.02	0.0003
10	0.01	0.0004
15	0.01	0.0005
20	0.002	0.0001
25	0	0

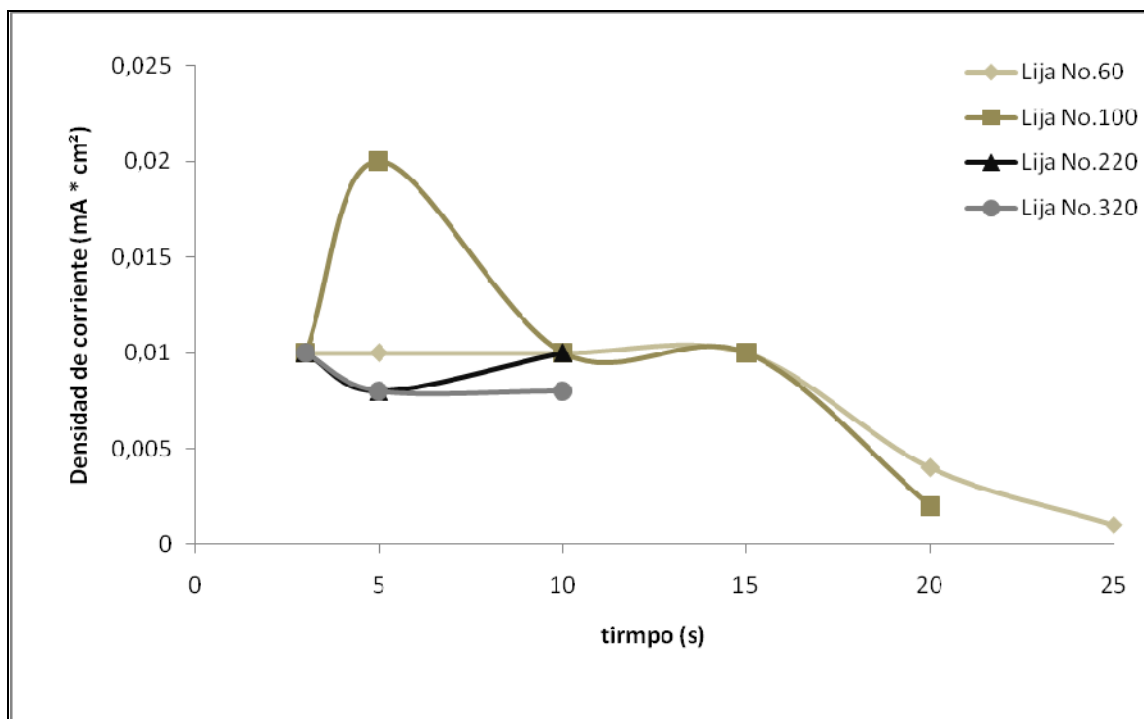
Tabla VII.14 Lija No.220

Tiempo (s)	Densidad de corriente (mA * cm ²)	Masa depositada (g)
1	0	0
3	0.01	0.0001
5	0.008	0.0001
10	0.01	0.0003
15	0	0

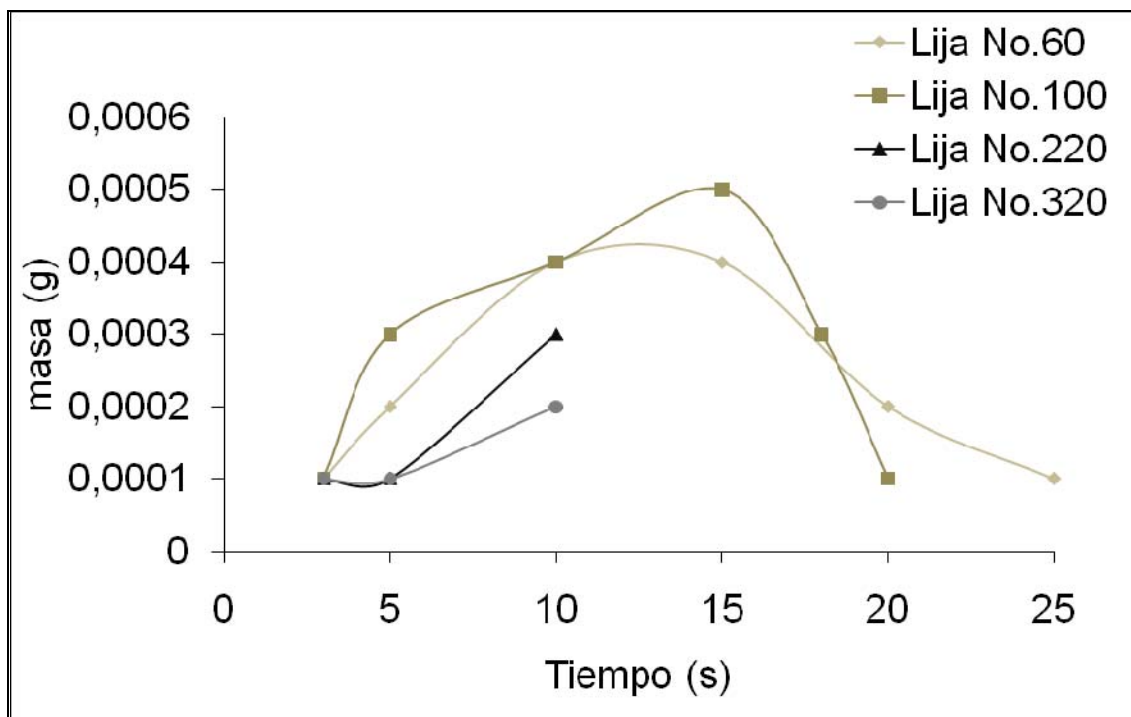
Tabla VII.15 Lija No.320

Tiempo (s)	Densidad de corriente (mA * cm ²)	Masa depositada (g)
1	0	0
3	0.01	0.0001
5	0.008	0.0001
10	0.008	0.0002
15	0	0

Las gráficas VII.8 y VII.9 representan los resultados obtenidos.



Gráfica VII.8, corriente generada con cada lija a una solución de 0.7 M.



Gráfica VII.9, en esta gráfica se muestran los tiempos en los que ocurrieron los mejores depósitos con una sustancia de 0.7 M.

Para la lija No. 60 (rómbrica), el mejor depósito se encuentra entre 10-13 segundos, dejando de existir adherencia a los 30.

Para la lija No. 100 (cuadrada), no hay depósito en los tiempos 1 y 25 en los cuales no hay adherencia, y el mejor depósito es en 13-15 segundos.

Para la lija No. 220 (triangular), en este caso el mejor depósito se encuentra en 7 y 9 segundos, pero cabe mencionar que existen problemas de adherencia en casi todos los tiempos.

Para la lija No. 320 (circular), con esta lija es difícil encontrar un buen recubrimiento ya que en todos se encuentran problemas de adherencia.

Los resultados para la sustancia de **concentración 1 M** fueron los siguientes:

Tabla VII.16 Lija No.60

Tiempo (s)	Densidad de corriente (mA * cm ²)	Masa depositada (g)
1	0	0
3	0.01	0.0001
5	0.008	0.0001
10	0.008	0.0002
15	0.008	0.0003
20	0.002	0.0001
25	0	0

Tabla VII.17 Lija No.100

Tiempo (s)	Densidad de corriente (mA * cm ²)	Masa depositada (g)
1	0.04	0.0001
3	0.01	0.0001
5	0.02	0.0003
10	0.02	0.0005
15	0.005	0.0002
20	0.001	0.0002
25	0	0

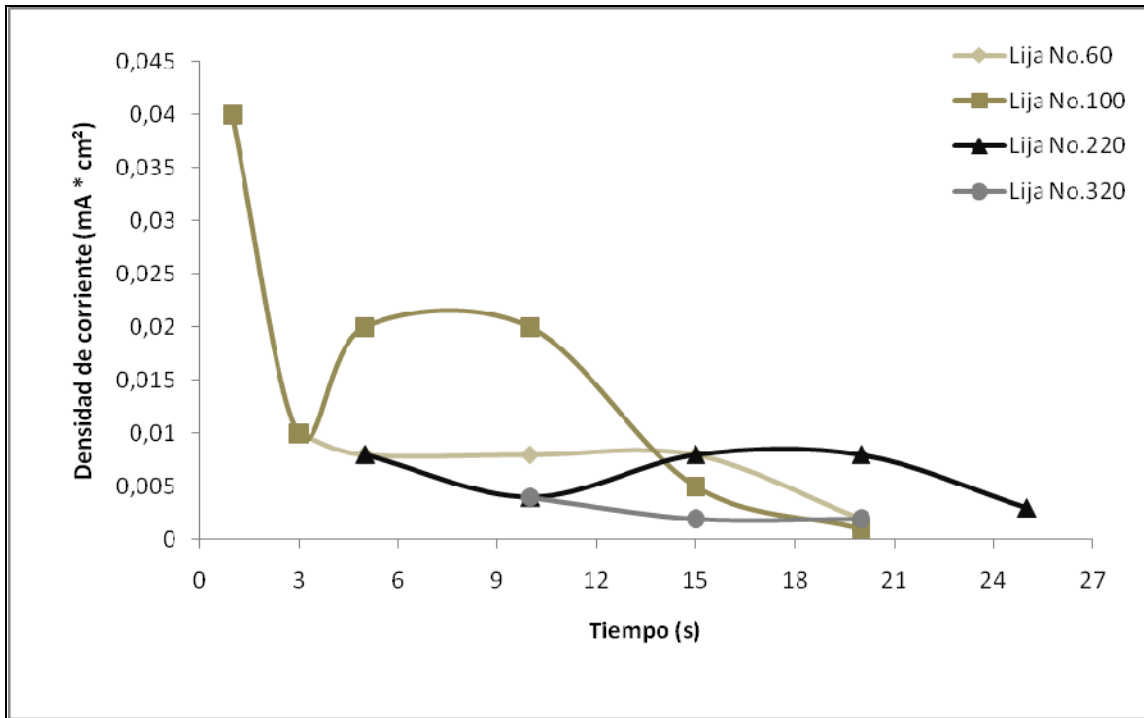
Tabla VII.18 Lija No.220

Tiempo (s)	Densidad de corriente (mA * cm ²)	Masa depositada (g)
1	0	0
3	0	0
5	0.008	0.0001
10	0.004	0.0001
15	0.008	0.0003
20	0.008	0.0004
25	0.003	0.0002
30	0	0

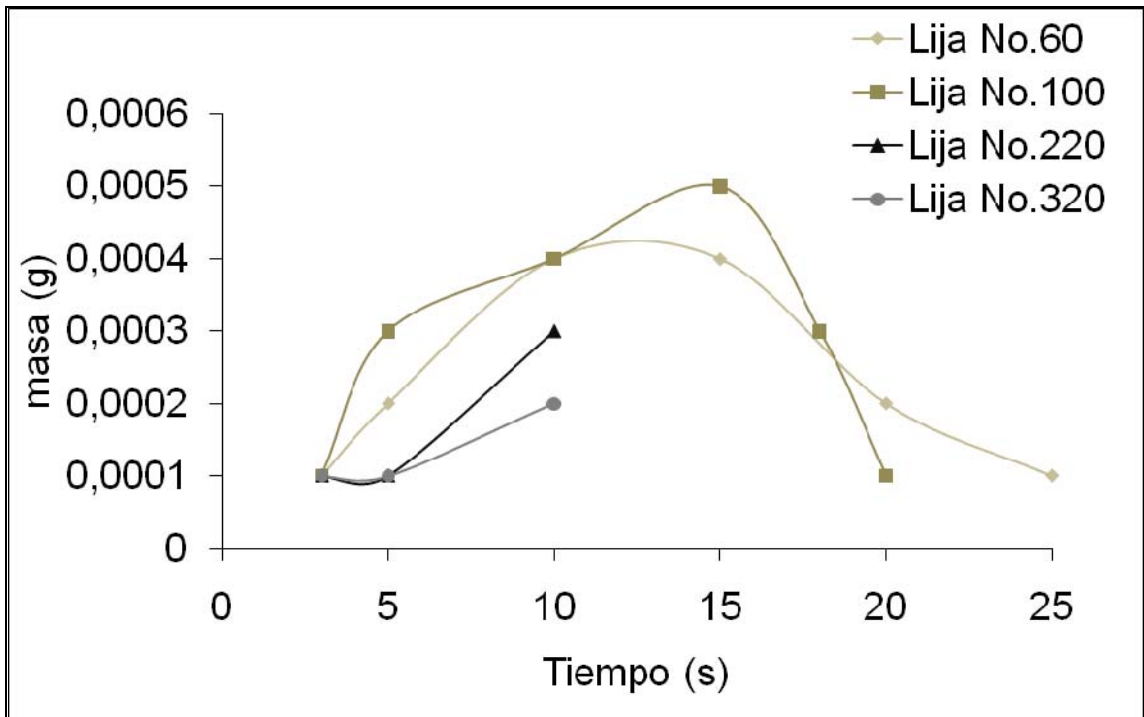
Tabla VII.19 Lija No.320

Tiempo (s)	Densidad de corriente (mA * cm ²)	Masa depositada (g)
1	0	0
3	0	0
5	0	0
10	0.004	0.0001
15	0.002	0.0001
20	0.002	0.0001
25	0	0

Las gráficas VII.10 y VII.11 representan los resultados obtenidos.



Gráfica VII.10, corriente generada con cada lija a una solución de 1 M.



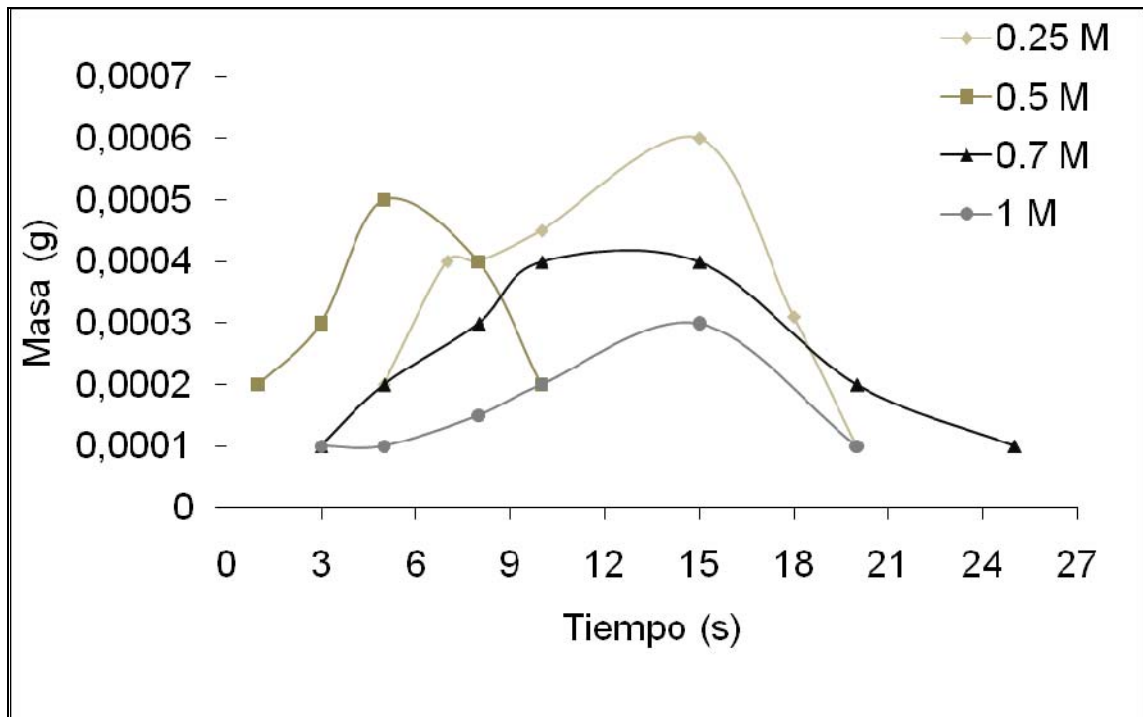
Gráfica VII.11, en esta grafica se muestran los tiempos en los que ocurrieron los mejores depósitos con una sustancia de 1 M.

Para la lija No. 60 (r6mbica), el recubrimiento tiene problemas en 3, 5 y 25 segundos, en 30 segundos deja de existir la adherencia, y el mejor dep6sito se encuentra entre 12-14 [s].

Para la lija No. 100 (cuadrada), aqu4 hay dep6sito desde el primer segundo, pero el mejor dep6sito se encuentra a los 9-11 segundos llegando a los 20, a los 25 deja de haber adherencia.

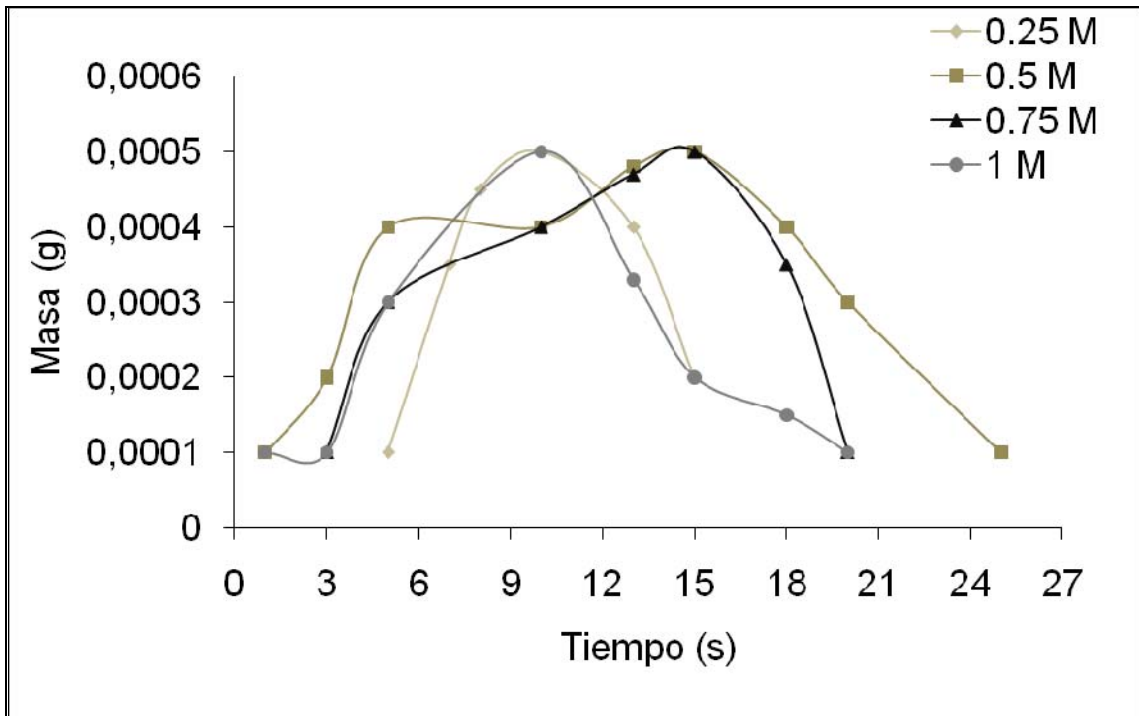
Para la lija No. 220 (triangular), no existe adherencia en los tiempos 13 y 30 segundos y solo en los par6metros 16-19 existe buena adherencia.

Para la lija No. 320 (circular), con este tipo de acabado no hay buena adherencia en ninguno de los tiempos estimados.



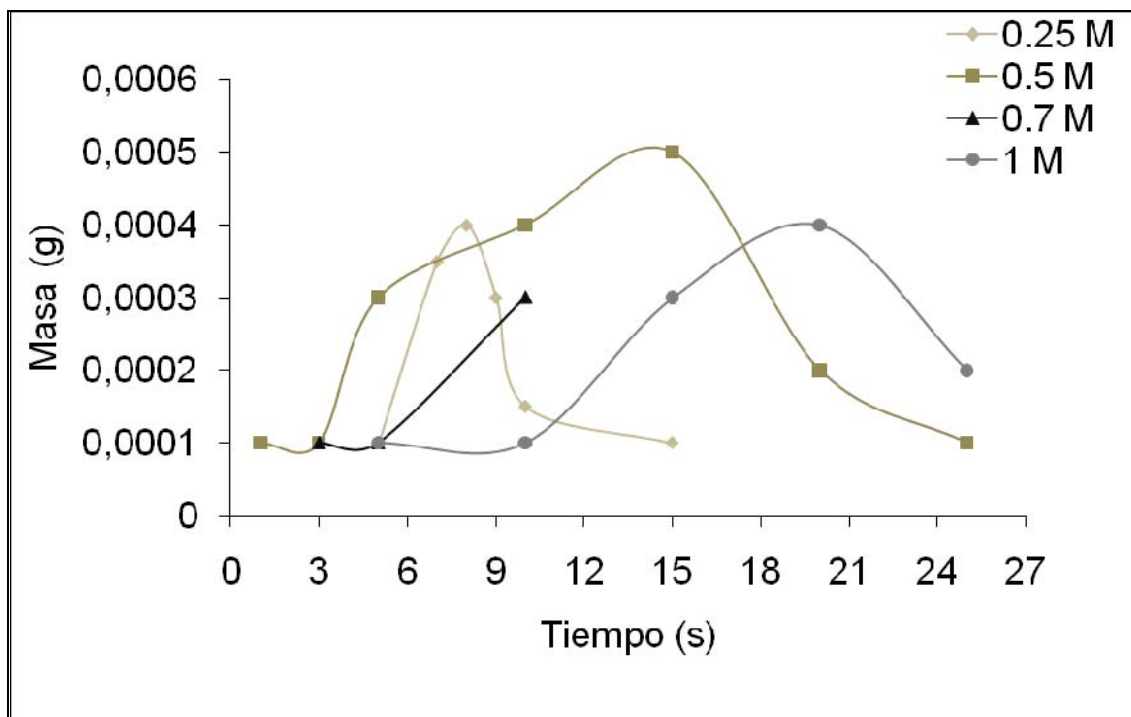
Gr4fica VII.12, aqu4 se representa el comportamiento de la lija del n6mero 60 en todas las sustancias 0.25, 0.5, 0.7 y 1 M, la serie r6mbica se refiere a la sustancia 0.25 m, la cuadrada a la de 0.5 M, la triangular a la de 0.7 M y la circular a la de 1 M

Para la lija del n6mero 60, su comportamiento es similar con las sustancias 0.25, 0.7 y 1 molar ya que el mayor dep6sito se da en el intervalo de 13-15 segundos, solo cuando se trabaj6 con la sustancia de 0.5 molar el comportamiento cambia reduci6ndose los tiempo para el dep6sito, d4ndose el mayor dep6sito a los 5 segundos.



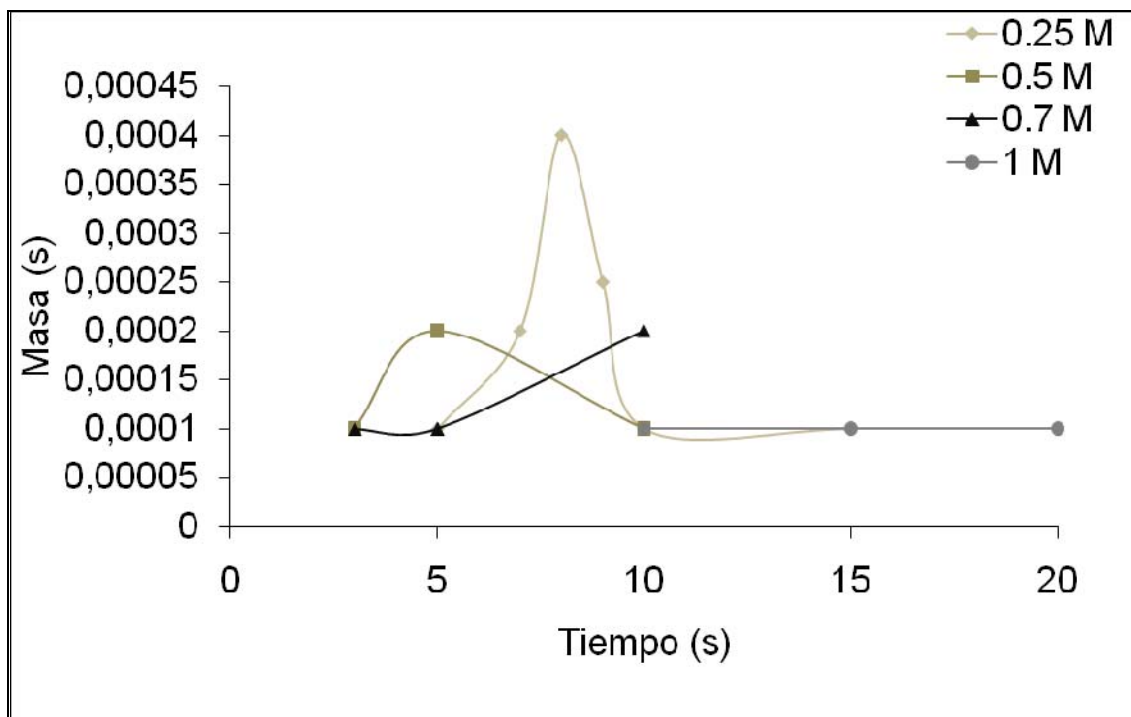
Gráfica VII.13, aquí se representa el comportamiento de la lija del número 100 en todas las sustancias 0.25, 0.5, 0.7 y 1 M, la serie rómbica se refiere a la sustancia 0.25 m, la cuadrada a la de 0.5 M, la triangular a la de 0.7 M y la circular a la de 1 M.

En la gráfica VII.13 los comportamientos de la lija 100 son muy parecidos ya que los mayores depósitos son de 0.0005 gramos, solo que para las sustancias de 0.25 y 1 molar se da alrededor de 8 y 9 segundos, mientras que para las sustancias de 0.5 y 0.7 molar se da en 15-17 segundos.



Gráfica VII.14, aquí se representa el comportamiento de la lija del número 220 en todas las sustancias 0.25, 0.5, 0.7 y 1 M, la serie rómbica se refiere a la sustancia 0.25 m, la cuadrada a la de 0.5 M, la triangular a la de 0.7 M y la circular a la de 1 M.

En la gráfica VII.14 se representan los mejores depósitos para todas las sustancias, para 0.25 molar el mejor depósito se dio en 8 segundos, para 0.5 molar se dio en 15 segundos, para 0,7 molar se ocasionaron problemas de adherencia pero se logró el mejor depósito en 9 segundos y para 1 molar el mejor depósito se extendió hasta los 20 segundos, cabe destacar que para esta lija fue muy variante su comportamiento ante las distintas concentraciones de las sustancias.



Gráfica VII.15, aquí se representa el comportamiento de la lija del número 320 en todas las sustancias 0.25, 0.5, 0.7 y 1 M, la serie rómbica se refiere a la sustancia 0.25 m, la cuadrada a la de 0.5 M, la triangular a la de 0.7 M y la circular a la de 1 M.

La gráfica VII.15, representa el comportamiento de la lija del número 320 a lo largo de todas las sustancias, como se observa el mejor depósito se obtuvo con la sustancia de 0.25 molar en el intervalo de tiempo de 8-10 segundos.

Es de mucha importancia resaltar que con esta lija siempre se presentaron problemas de adherencia, sin importar la concentración o el tiempo, es por esto, que no se recomienda utilizar esta lija o ninguna de denominación mayor ya que no crea los puntos de anclaje necesarios para lograr una buena adherencia y con esto un buen depósito.

Analizando los resultados arrojados por las gráficas VII.12, VII.13, VII.14 y VII.15, se observa que existen problemas en la adherencia del cobre, cuando se hacen lijados con el papel lija del número 60 y 320, esto puede ser debido a que, en el caso de la lija del número 320 no se generan los suficientes puntos de anclaje requeridos para lograr un buen depósito de cobre, y para la lija del número 60 ocurre algo similar, el lijado deja espacios muy grandes los cuales son llenados muy rápidamente por los átomos de cobre, con lo cual se saturan los espacios libre y los átomos de cobre ya no entran en ningún lugar, lo que ocasiona que el recubrimiento se rompa.

Capítulo VIII.

Obtención del recubrimiento

Tema VIII.1 Procedimiento para la obtención del recubrimiento.

En este apartado se darán los pasos a seguir para lograr un depósito adecuado, al igual que se darán tablas para poder identificar los mejores tiempos con las concentraciones adecuadas para llegar al mejor depósito.

Los pasos se listarán a continuación:

1. Una vez identificada la parte que se recubrirá, se deberá quitar todos los rebordes filosos, así como rebabas en existencia, se recomienda utilizar un esmeril.
2. Se deberá lijar la pieza (se selecciona la lija según los requerimientos de la pieza, así como el acabado superficial deseado), para de este modo eliminar las marcas dejadas por el esmeril.
3. La pieza tendrá que ser sumergida en acetona, por un periodo no mayor a 5 segundos, para de esta manera eliminar grasas y óxidos en la superficie del material.
4. Una vez retirada la pieza de la acetona, se limpiará con un trapo limpio.
5. Inmediatamente después de limpiar la pieza se sumergirá en el sulfato de cobre (los tiempos y las concentraciones de la sustancia se muestran en las tablas VIII.1 a VIII.16 de este capítulo), para sumergirla en el sulfato de cobre sólo basta con tomarla con la yema de los dedos y sumergirla hasta donde hayamos decidido que llegue nuestro depósito.
6. Se retira la pieza del sulfato de cobre y se lava con agua y de esta manera queda adherido el cobre a la pieza de acero.

A continuación se muestran las tablas VIII.1 a VIII.16 que corresponden a las cuatro concentraciones que se han trabajado, las cuales fueron 0.25, 0.5, 0.7 y 1 molar, en la cuales se listan los tiempos en los cuales hubo depósito y en los cuales no hay adherencia, también muestran los tiempos en los cuales existe mayor depósito y mejor adherencia.

Tabla VIII.1 Lija No. 60 a una sustancia de concentración de 0.25 Molar.

Tiempo (s)	Masa depositada (g)	Densidad de corriente (mA * cm ²)	Observaciones
3	---	---	No hay adherencia
5	0.0002	0.016	Adherencia
7	0.0004	0.022	Adherencia
8	0.0004	0.02	Adherencia
10	0.00045	0.017	Adherencia +
15	0.0006	0.016	Adherencia ++
20	0.0001	0.002	Adherencia -
25	---	---	No hay adherencia
Adherencia + = Buena adherencia (color dorado)			
Adherencia ++ = Buena adherencia (color rojizo)			
Adherencia - = Problemas de adherencia			
NOTA: El color dorado, refiere a un depósito de entre 1-3µm, mientras que el color rojizo refiere a un depósito de entre 4-5 µm.			

Tabla VIII.2 Lija No. 100 a una sustancia de concentración de 0.25 Molar

Tiempo (s)	Masa depositada (g)	Densidad de corriente (mA * cm ²)	Observaciones
3	---	---	No hay adherencia
5	0.0001	0.008	Adherencia
7	0.00035	0.02	Adherencia +
8	0.00045	0.02	Adherencia +
10	0.0005	0.02	Adherencia ++
15	0.0002	0.005	Adherencia -
20	---	---	No hay adherencia
Adherencia + = Buena adherencia (color dorado)			
Adherencia ++ = Buena adherencia (color rojizo)			
Adherencia - = Problemas de adherencia			
NOTA: El color dorado, refiere a un depósito de entre 1-3µm, mientras que el color rojizo refiere a un depósito de entre 4-5 µm.			

Tabla VIII.3 Lija No. 220 a una sustancia de concentración de 0.25 Molar

Tiempo (s)	Masa depositada (g)	Densidad de corriente (mA * cm ²)	Observaciones
3	---	---	No hay adherencia
5	0.0001	0.04	Adherencia -
7	0.0003	0.01	Adherencia +
8	0.0004	0.02	Adherencia ++
10	0.0002	0.008	Adherencia
15	0.0001	0.002	Adherencia -
20	---	---	No hay adherencia
Adherencia + = Buena adherencia (color dorado)			
Adherencia ++ = Buena adherencia (color rojizo)			
Adherencia - = Problemas de adherencia			
NOTA: El color dorado, refiere a un depósito de entre 1-3µm, mientras que el color rojizo refiere a un depósito de entre 4-5 µm.			

Tabla VIII.4 Lija No. 320 a una sustancia de concentración de 0.25 Molar

Tiempo (s)	Masa depositada (g)	Densidad de corriente (mA * cm ²)	Observaciones
3	---	---	No hay adherencia
5	0.0001	0.04	Adherencia -
7	0.0002	0.02	Adherencia +
8	0.0004	0.02	Adherencia +
10	0.0001	0.04	Adherencia
15	0.0001	0.02	Adherencia -
20	---	---	No hay adherencia
Adherencia + = Buena adherencia (color dorado)			
Adherencia ++ = Buena adherencia (color rojizo)			
Adherencia - = Problemas de adherencia			
NOTA: El color dorado, refiere a un depósito de entre 1-3µm, mientras que el color rojizo refiere a un depósito de entre 4-5 µm.			

TablaVIII.5 Lija No. 60 a una sustancia de concentración de 0.5 Molar

Tiempo (s)	Masa depositada (g)	Densidad de corriente (mA * cm ²)	Observaciones
1	0.0002	0.08	Adherencia
3	0.0003	0.04	Adherencia +
5	0.0005	0.04	Adherencia ++
10	0.0002	0.008	Adherencia -
15	---	---	No hay adherencia
Adherencia + = Buena adherencia (color dorado)			
Adherencia ++ = Buena adherencia (color rojizo)			
Adherencia - = Problemas de adherencia			
NOTA: El color dorado, refiere a un depósito de entre 1-3µm, mientras que el color rojizo refiere a un depósito de entre 4-5 µm..			

TablaVIII.6 Lija No. 100 a una sustancia de concentración de 0.5 Molar

Tiempo (s)	Masa depositada (g)	Densidad de corriente (mA * cm ²)	Observaciones
1	0.0001	0.04	Adherencia
3	0.0002	0.02	Adherencia
5	0.0004	0.03	Adherencia +
10	0.0004	0.01	Adherencia ++
15	0.0005	0.01	Adherencia ++
20	0.0003	0.006	Adherencia
25	0.0001	0.001	Adherencia -
30	---	---	No hay adherencia
Adherencia + = Buena adherencia (color dorado)			
Adherencia ++ = Buena adherencia (color rojizo)			
Adherencia - = Problemas de adherencia			
NOTA: El color dorado, refiere a un depósito de entre 1-3µm, mientras que el color rojizo refiere a un depósito de entre 4-5 µm.			

TablaVIII.7 Lija No. 220 a una sustancia de concentración de 0.5 Molar

Tiempo (s)	Masa depositada (g)	Densidad de corriente (mA * cm ²)	Observaciones
1	0.0001	0.04	Adherencia -
3	0.0001	0.01	Adherencia -
5	0.0003	0.02	Adherencia
10	0.0004	0.01	Adherencia +
15	0.0005	0.01	Adherencia ++
20	0.0002	0.004	Adherencia
25	0.0001	0.001	Adherencia -
30	---	---	No hay adherencia
Adherencia + = Buena adherencia (color dorado)			
Adherencia ++ = Buena adherencia (color rojizo)			
Adherencia - = Problemas de adherencia			
NOTA: El color dorado, refiere a un depósito de entre 1-3µm, mientras que el color rojizo refiere a un depósito de entre 4-5 µm.			

TablaVIII.8 Lija No. 320 a una sustancia de concentración de 0.5 Molar

Tiempo (s)	Masa depositada (g)	Densidad de corriente (mA * cm ²)	Observaciones
1	---	---	No hay adherencia
3	0.0001	0.01	Adherencia -
5	0.0002	0.021	Adherencia
10	0.0001	0.004	Adherencia -
15	---	---	No hay adherencia
Adherencia + = Buena adherencia (color dorado)			
Adherencia ++ = Buena adherencia (color rojizo)			
Adherencia - = Problemas de adherencia			
NOTA: El color dorado, refiere a un depósito de entre 1-3µm, mientras que el color rojizo refiere a un depósito de entre 4-5 µm.			

TablaVIII.9 Lija No. 60 a una sustancia de concentración de 0.7 Molar

Tiempo (s)	Masa depositada (g)	Densidad de corriente (mA * cm ²)	Observaciones
1	---	---	No hay adherencia
3	0.0001	0.01	Adherencia -
5	0.0002	0.01	Adherencia
10	0.0004	0.01	Adherencia +
15	0.0004	0.01	Adherencia ++
20	0.0002	0.004	Adherencia
25	0.0001	0.001	Adherencia -
30	---	---	No hay adherencia
Adherencia + = Buena adherencia (color dorado)			
Adherencia ++ = Buena adherencia (color rojizo)			
Adherencia - = Problemas de adherencia			
NOTA: El color dorado, refiere a un depósito de entre 1-3µm, mientras que el color rojizo refiere a un depósito de entre 4-5 µm.			

TablaVIII.10 Lija No. 100 a una sustancia de concentración de 0.7 Molar

Tiempo (s)	Masa depositada (g)	Densidad de corriente (mA * cm ²)	Observaciones
1	---	---	No hay adherencia
3	0.0001	0.01	Adherencia -
5	0.0003	0.02	Adherencia
10	0.0004	0.01	Adherencia +
15	0.0005	0.01	Adherencia ++
20	0.0001	0.002	Adherencia -
25	---	---	No hay adherencia
Adherencia + = Buena adherencia (color dorado)			
Adherencia ++ = Buena adherencia (color rojizo)			
Adherencia - = Problemas de adherencia			
NOTA: El color dorado, refiere a un depósito de entre 1-3µm, mientras que el color rojizo refiere a un depósito de entre 4-5 µm.			

TablaVIII.11 Lija No. 220 a una sustancia de concentración de 0.7 Molar

Tiempo (s)	Masa depositada (g)	Densidad de corriente (mA * cm ²)	Observaciones
1	---	---	No hay adherencia
3	0.0001	0.01	Adherencia -
5	0.0001	0.008	Adherencia -
10	0.0003	0.01	Adherencia
15	---	---	No hay adherencia
Adherencia + = Buena adherencia (color dorado)			
Adherencia ++ = Buena adherencia (color rojizo)			
Adherencia - = Problemas de adherencia			
NOTA: El color dorado, refiere a un depósito de entre 1-3µm, mientras que el color rojizo refiere a un depósito de entre 4-5 µm.			

TablaVIII.12 Lija No. 320 a una sustancia de concentración de 0.7 Molar

Tiempo (s)	Masa depositada (g)	Densidad de corriente (mA * cm ²)	Observaciones
1	---	---	No hay adherencia
3	0.0001	0.01	Adherencia -
5	0.0001	0.008	Adherencia -
10	0.0002	0.01	Adherencia
15	---	---	No hay adherencia
Adherencia + = Buena adherencia (color dorado)			
Adherencia ++ = Buena adherencia (color rojizo)			
Adherencia - = Problemas de adherencia			
NOTA: El color dorado, refiere a un depósito de entre 1-3µm, mientras que el color rojizo refiere a un depósito de entre 4-5 µm.			

TablaVIII.13 Lija No. 60 a una sustancia de concentración de 1 Molar

Tiempo (s)	Masa depositada (g)	Densidad de corriente (mA * cm ²)	Observaciones
1	---	---	No hay adherencia
3	0.0001	0.01	Adherencia -
5	0.0001	0.008	Adherencia -
10	0.0002	0.008	Adherencia +
15	0.0003	0.008	Adherencia ++
20	0.0001	0.001	Adherencia -
25	---	---	No hay adherencia
Adherencia + = Buena adherencia (color dorado)			
Adherencia ++ = Buena adherencia (color rojizo)			
Adherencia - = Problemas de adherencia			
NOTA: El color dorado, refiere a un depósito de entre 1-3µm, mientras que el color rojizo refiere a un depósito de entre 4-5 µm.			

TablaVIII.14 Lija No. 100 a una sustancia de concentración de 1 Molar

Tiempo (s)	Masa depositada (g)	Densidad de corriente (mA * cm ²)	Observaciones
1	0.0001	0.04	Adherencia
3	0.0001	0.01	Adherencia +
5	0.0003	0.02	Adherencia +
10	0.0005	0.02	Adherencia ++
15	0.0002	0.005	Adherencia -
20	0.0001	0.001	Adherencia -
25	---	---	No hay adherencia
Adherencia + = Buena adherencia (color dorado)			
Adherencia ++ = Buena adherencia (color rojizo)			
Adherencia - = Problemas de adherencia			
NOTA: El color dorado, refiere a un depósito de entre 1-3µm, mientras que el color rojizo refiere a un depósito de entre 4-5 µm.			

TablaVIII.15 Lija No. 220 a una sustancia de concentración de 1 Molar

Tiempo (s)	Masa depositada (g)	Densidad de corriente (mA * cm ²)	Observaciones
1	---	---	No hay adherencia
3	---	---	No hay adherencia
5	0.0001	0.008	Adherencia -
10	0.0001	0.004	Adherencia -
15	0.0003	0.008	Adherencia +
20	0.0004	0.008	Adherencia ++
25	0.0002	0.003	Adherencia
30	---	---	No hay adherencia
Adherencia + = Buena adherencia (color dorado)			
Adherencia ++ = Buena adherencia (color rojizo)			
Adherencia - = Problemas de adherencia			
NOTA: El color dorado, refiere a un depósito de entre 1-3µm, mientras que el color rojizo refiere a un depósito de entre 4-5 µm.			

TablaVIII.16 Lija No. 320 a una sustancia de concentración de 1 Molar

Tiempo (s)	Masa depositada (g)	Densidad de corriente (mA * cm ²)	Observaciones
1	---	---	No hay adherencia
3	---	---	No hay adherencia
5	---	---	No hay adherencia
10	0.0001	0.004	Adherencia -
15	0.0001	0.002	Adherencia -
20	0.0001	0.002	Adherencia -
25	---	---	No hay adherencia
Adherencia + = Buena adherencia (color dorado)			
Adherencia ++ = Buena adherencia (color rojizo)			
Adherencia - = Problemas de adherencia			
NOTA: El color dorado, refiere a un depósito de entre 1-3µm, mientras que el color rojizo refiere a un depósito de entre 4-5 µm.			

Capítulo IX.

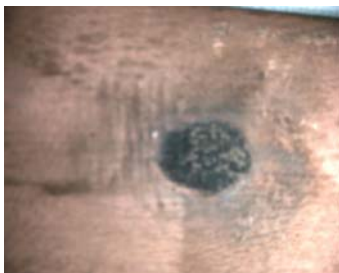
Depósitos de cobre.

Tema IX.1 Observación de malos depósitos de cobre mediante un estereoscopio.

Con la finalidad de determinar la calidad de los recubrimientos, se utilizó un estereoscopio, se tomaron las imágenes que se muestran a continuación, las cuales corresponden a tres tipos de defectos, los cuales son:

1. Por tiempo.
2. Por lijado.
3. Por concentración de sustancia.

Las imágenes a, b, c y d presentan un mal recubrimiento, por las dificultades que se obtienen debido a un mal cálculo del tiempo, mientras que las imágenes e, f, g, h, representan un depósito deficiente por mala concentración de la sustancia, las imágenes i, j, k, l, corresponden a un mal lijado en las piezas a recubrir:



a)



b)



c)



d)



e)



f)



g)



h)



i)



j)



k)



l)

Tema IX.2 Observación de buenos depósitos de cobre mediante un estereoscopio.

Las imágenes que se muestran a continuación corresponden a los mejores depósitos, con base en los siguientes parámetros los cuales son:

1. Por tiempo.
2. Por lijado.
3. Por concentración de sustancia.

Las imágenes m, n, ñ, o, corresponden a un buen depósito por tiempo, mientras que las imágenes p, q, r, s, corresponden a un buen depósito por lijado y la imágenes t, u, v, w, corresponden a un buen depósito por concentración de la sustancia.



m)



n)



ñ)



o)



p)



q)



r)



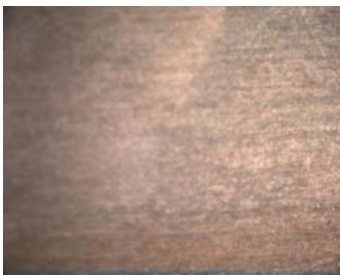
s)



t)



u)



v)



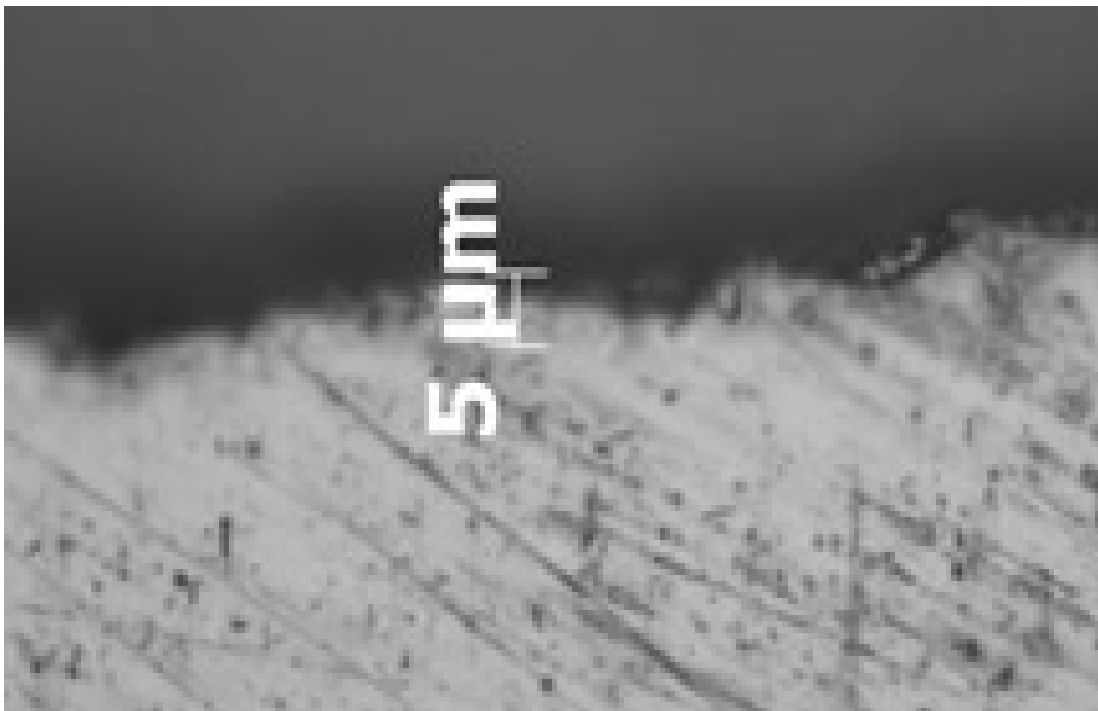
w)

Tema IX.3 Metalografía de los mejores depósitos de cobre.

Las micrografías a.1 y a.2 corresponden a los mejores depósitos de cobre, y en las cuales se observó que se logró un espesor de hasta 5 micras.



a.1) espesor de la capa de cobre sobre el acero



a.2) espesor irregular de la capa de cobre depositada en el acero

Capítulo X.

Conclusiones.

Tema X. Conclusiones.

Se obtuvo un recubrimiento de cobre de buena calidad, de color rojizo y buena adherencia, con una masa de 0.0008 gramos depositada en una área de 7.5 cm^2 , con un volumen de 0.0001 cm^3 y 5 micras de espesor, cumpliéndose así el objetivo principal de este trabajo.

El acabado superficial logrado con las lijas del número 60 y 320 no son recomendables para lograr este depósito. Por el contrario el acabado superficial logrado por el papel lija del número 100 es el más adecuado para llevar a cabo este depósito, ya que ésta desempeñó un comportamiento similar en las cuatro distintas sustancias.

El comportamiento del depósito en las diferentes concentraciones de sulfato de cobre, solo afecta el factor tiempo, ya que se observa que entre más grande sea la concentración, los tiempos de inmersión se reducen, y mientras más pequeña sea la concentración, el tiempo de inmersión es mayor, a su vez cuando la sustancia tiene concentraciones muy altas o muy bajas es difícil realizar el depósito, por lo cual se recomienda que la concentración sea de 0.7 molar para lograr un buen depósito.

Haciendo una comparación entre la electrodeposición y los depósitos sin corriente que se llevaron a cabo en este trabajo, se concluye que los depósitos sin corriente son más efectivos para fines de este trabajo, ya que con la electrodeposición solo se logró que el cobre se depositara, pero nunca se adhirió el cobre al acero, la explicación de este fenómeno se da en el capítulo VII; mientras que en los “depósitos sin corriente” se obtuvo un depósito de buena calidad. Cabe mencionar que las diferencias principales de estos dos métodos radica en: una fuente de corriente externa a la celda electrolítica, y un cátodo que para este tipo de depósito generalmente es de cobre. En la electrodeposición existen reacciones de oxidación y reducción, siendo el cobre el que se oxida, mientras que en los depósitos sin corriente no existe este fenómeno, es por eso, que solo se adhiere una capa superficial de cobre.

Con fines de obtener un parámetro de la adherencia lograda en este trabajo, se realizaron ensayos de adherencia a piezas con buenos depósitos, los resultados obtenidos fueron que con tan solo poca fuerza el depósito se despegaba del acero, por lo cual se concluye que la adherencia es muy baja.

Para poder explicar un poco la poca adherencia del depósito, se necesita saber que el cobre solo está adherido superficialmente al acero, por lo que no hay ninguna fuerza interatómica que los una, como puede ser un enlace covalente o iónico, es por esto que hay muy poca fuerza de adherencia entre el cobre y el acero de bajo carbono.

Sugerencias y recomendaciones.

Se sugiere que antes de realizar los depósitos sin corriente, se realice un tratamiento térmico a la pieza a recubrir, esto es con el fin de lograr más puntos de anclaje en el acero, para que por este medio se logre una mejor adherencia del cobre.

Una sugerencia más para este tipo de recubrimientos, es que no es recomendable aplicarse para piezas que se encuentren en superficie funcional, es decir, piezas que se encuentren en contacto directo y dinámico con otras, ya que se corre el riesgo de que el recubrimiento se agriete y se desprenda.

Existe un método paralelo a este procedimiento el cual recibe el nombre de electroless, recibe este nombre ya que como al igual que los depósitos sin corriente no se necesita ninguna fuente de electricidad para llevar a cabo este procedimiento, electroless tiene el mismo objetivo que este trabajo, generar un depósito de un metal sobre otra superficie. Este procedimiento también se utiliza para recubrir plásticos con capas de algún tipo de metal, así que se recomienda buscar información acerca de este procedimiento para tener un mejor panorama de este tipo de recubrimientos.

Se sugiere hacer este depósito a piezas finales, esto es, piezas que ya no estarán sometidas a maquinados, cortes, desbastes, etc. Ya que el depósito de cobre se podría desprender del acero.

Cabe mencionar que otra aplicación de este recubrimiento, es proteger a la pieza del contacto directo con el medio en un proceso térmico, un ejemplo es evitar la oxidación de la pieza base (acero), para posteriormente retirar la capa de cobre y solo quede el acero.

Por último no se recomienda aplicar esfuerzos y deformaciones a la pieza tras haberla recubierto de cobre ya que es posible que el recubrimiento sufra daños o desprendimientos.

Bibliografía.

- 1.- R.C. Weast, Ed; Handbook of chemistry and physics, 55th en; CRC press, 1974.
- 2.- N.J. Simon, E.S. Drexler, and R.P. Reed, Properties of Copper and Copper Alloys at Cryogenic Temperatures, NIST, Monograph 177, national Institute of standards and technology, U.S. Department of Commerce, Washington, D.C. Feb. 1992, p 20.1-20.5.
- 3.- Properties and Selection of metals, Vol 1, Metals Handbook, 8th ed; American Society for Metals, 1961.
- 4.- J.H. Mendenhall, Ed; Understanding Copper Alloys, Olin Brass, East Alton, II, 1977, p 87.
- 5.- Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose materials, Vol 2, ASM Handbook, ASM International, 1990.
- 6.- B. Landolt-Bornstein, III, Technology, Classification, Value and Behavior of Metallic Materials (Technik, Teil, Stoffwerte, und Verhanlten von metallischen werkstoffen), Springer-Verlag, 1964.
- 7.- Copper rod alloys for Machined products, Copper Development Association Inc. 1993.
- 8.- American Institute of Physics Handbook, 3rd ed; McGraw-Hill, 1972.
- 9.- Fundamentos del tratamiento y protección de superficies metálicas, D. R. Gabe, 1^o edición, 1975.
- 10.- Electrodeposición de metales: fundamentos, operaciones e instalaciones, Enrique Julve Salvadó, No. P 380 .
- 11.- Electroquímica moderna, John O´Bockris, Volumen 2, 1980.
- 12.-Ciencia e ingeniería de los materiales, Donald R. Askeland, 2005, 1004 páginas.
- 13.- Tecnología de materiales, Vicente Amigó Borrás, Ed. Uni. Politéc. Valencia, 2003, 560 páginas.
- 14.-Química: la ciencia central, Theodore L. Brown, Bruce E. ed. Pearson educación, 2004, 1152 páginas.
- 15.-Química, Enrique Gutiérrez Ríos, ed. Reverte, 1984, 500 páginas.

- 16.- Metalurgia general, F.R. Morral, Ed. Reverte, 1985, 750 páginas.
- 17.-Manufactura, ingeniería y tecnología, Steven R. Schmid, Figueroa López, Pearson educación , 2002, 1152 páginas.
- 18.-Tratamientos térmicos de los metales, Pere Molera Solá, 1991, 127 páginas.
- 19.- Copper, its trade, manufacture, use and enviromental status, Gunter Josep, ed. Konrad J .A.
- 20.- Electrodepositos de cobre y de niquel, Emmanuel Ballesteros Barrera, ed. UAM.

Mesografía.

- 1.- <http://www.scribd.com/doc/17700409/electrodeposicion-de-cobre>
- 2.- <http://www.fandeli.com.mx/sistemas.html>
- 3.- <http://www.jmcprl.net/glosario/electrodeposicion.htm>