



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

DISEÑO DE UN MÓDULO DE ELECTRODEPOSICIÓN METÁLICA POR MEDIOS ELECTROLÍTICOS

Kelly Michelle Cortez Alvarez

Asesorado por el Dr. Sc. Ing. Roberto Alejandro Aguilar Rivas

Guatemala, febrero de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UN MÓDULO DE ELECTRODEPOSICIÓN
METÁLICA POR MEDIOS ELECTROLÍTICOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

KELLY MICHELLE CORTEZ ALVAREZ

ASESORADO POR EL DR. SC. ING. ROBERTO ALEJANDRO AGUILAR RIVAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA MECÁNICA

GUATEMALA, FEBRERO DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
EXAMINADOR	Ing. Fredy Mauricio Monroy Peralta
EXAMINADOR	Ing. Roberto Guzmán Ortiz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE UN MÓDULO DE ELECTRODEPOSICIÓN METÁLICA POR MEDIOS ELECTROLÍTICOS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 02 de agosto de 2013.

A handwritten signature in black ink, enclosed in an oval. The signature is stylized and appears to read 'Kelly Michelle Cortez Alvarez'. There is a small 'v' mark above the signature.

Kelly Michelle Cortez Alvarez

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA
ECUELA DE INGENIERIA MECANICA

Guatemala, 14 de enero de 2014

Ingeniero Julio César Campos Paiz
Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Ingeniero Campos:

Por la presente, le estoy informando que he procedido con la revisión final del trabajo de graduación titulado **"DISEÑO DE UN MÓDULO DE ELECTRODEPOSICIÓN METÁLICA POR MEDIOS ELECTROLÍTICOS"** realizado por la estudiante de Ingeniería Mecánica **Kelly Michelle Cortez Alvarez**, carné de identificación número 200715144, quien contó con la asesoría del suscrito.

El trabajo se desarrolló dentro del marco de "Proyecto de Investigaciones Metalúrgicas" de la escuela de Ingeniería Mecánica, a cargo del suscrito, por lo que cuenta con mi total aprobación. En tal virtud, estoy solicitándole darle el trámite correspondiente.

Atentamente,

Dr. Sc. Ing. Roberto Alejandro Aguilar Rivas

Roberto A. Aguilar Rivas

ING. MECÁNICO
Colegiado 862



El coordinador del Área de Materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado, DISEÑO DE UN MÓDULO DE ELECTRODEPOSICIÓN METÁLICA POR MEDIOS ELECTROLÍTICOS, de la estudiante **Kelly Michelle Cortez Alvarez**, recomienda su aprobación.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Carlos Humberto Pérez Rodríguez'.



Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
Coordinador de Área

Guatemala, enero de 2014.

CP/mjm



Ref.E.I.Mecánica.28.2014

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, después de conocer el dictamen del asesor, con la aprobación del Coordinador del Área de Materiales al Trabajo de Graduación titulado, DISEÑO DE UN MÓDULO DE ELECTRODEPOSICIÓN METÁLICA POR MEDIOS ELECTROLÍTICOS, de la estudiante **Kelly Michelle Cortez Alvarez**, procede a la autorización del mismo.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Julio César Campos Paiz
DIRECTOR



Guatemala, febrero de 2014.

JC/mjm



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE UN MÓDULO DE ELECTRODEPOSICIÓN METÁLICA POR MEDIOS ELECTROLÍTICOS**, presentado por la estudiante universitaria: **Kelly Michelle Cortez Alvarez**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
Decano



Guatemala, febrero de 2014

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Mi madre

Maria R. Alvarez R., por ser una mujer luchadora y llegar junto a mí al final de este recorrido, mis triunfos también son tuyos e inspirados en ti. Porque gracias a tu cariño, consejos y apoyo he logrado realizar uno de los más grandes anhelos de mi vida, fruto del inmenso amor y confianza que depositaste en mí.

Mi padre

Luis R. Cortez A., por su comprensión, apoyo económico y moral hasta el término de esta etapa de mi vida y alentarme a lograr esta hermosa realidad.

Mi hermano

Luis R. Cortez A., por demostrarme que nunca es tarde, no importa lo que se haya vivido, los errores que se hayan cometido, las oportunidades que se hayan dejado pasar, que no es el final del camino y que siempre estamos a tiempo para volar y alcanzar nuestras metas.

Mi padrino

Luis E. Santos L., por ser luz y guía en mi vida, ayudarme cada día a cruzar con firmeza y sabiduría el camino de la superación académica y espiritual.

Mis tías

Laura Cortez y Ciria Alvarez, por el cariño y apoyo moral que siempre he recibido de ustedes y con el cual he logrado culminar uno de mis más grandes anhelos.

Mis primos

Graciela Gonzales, Rosemary, Margareth y Eduardo Alvarez, por ser fuente de alegría, depositar su confianza en mí y ser mi hombro en los momentos de debilidad.

Mario Arévalo

Por ser comprensivo y dar lo mejor de sí mismo sin esperar nada a cambio... porque sabes escuchar y brindar ayuda cuando es necesario, por estar presente en las derrotas y triunfos de mi vida y motivarme a ser constante, te has ganado mi cariño y confianza.

Mis amigos

Allan Dionisio, Andrea Moscoso, Brenda Portocarrero, Dennis Pérez, Fernando López, Hugo Palencia, José Tiu, Telma Sequén y Walfred Ordoñez, por compartir tantos momentos alegres, llenos de bromas y sonrisas, por el cariño, comprensión y apoyo brindado en estos últimos años.

AGRADECIMIENTOS A:

**Dr. Sc. Ing. Roberto
Aguilar**

Por su orientación académica y asesoría en el desarrollo de este trabajo.

Ing. Víctor Ruiz

Por su colaboración y tiempo dedicado en los laboratorios de maquinado en el mecanizado de piezas.

**Facultad de Ciencias
Químicas y Farmacia**

Por permitirme utilizar sus instalaciones y equipo para realizar la parte experimental de este trabajo.

Lic. Eduardo Robles

Por su contribución en la parte experimental, siguiendo el lema de esta casa de estudios: "Id y enseñad a todos", y quien compartió su conocimiento pragmático.

Ing. Roberto Guzmán

Porque más allá de su actividad de docencia, brinda amistad, consejo y apoyo.

1.6.1.	Modificación del medio	22
1.6.2.	Modificación del diseño	23
1.6.3.	Recubrimientos metálicos	23
1.6.3.1.	Preparación de la superficie	24
1.6.3.2.	Recubrimientos por electrólisis.....	26
1.6.3.3.	Recubrimientos por inmersión en baño de metal fundido.....	27
1.6.3.4.	Recubrimientos por metalización	28
1.6.3.5.	Recubrimientos por cementación	29
1.6.3.6.	Recubrimientos por chapado.....	30
1.6.4.	Modificación del metal base	30
1.6.5.	Polarización electroquímica.....	30
2.	PRINCIPIOS DE ELECTRODEPOSICIÓN	33
2.1.	Definición de electrodeposición.....	33
2.2.	Principios de electroquímica	33
2.3.	Principios de electricidad.....	34
2.4.	Proceso electrolítico	37
2.5.	Depósitos electrolíticos	38
2.6.	Nomenclatura para electrodeposición	39
2.7.	Factores de relevancia	40
2.7.1.	Materiales.....	41
3.	DISEÑO Y ENSAMBLE DEL EQUIPO PARA ELECTRODEPÓSITOS DE COBRE.....	45
3.1.	Módulo de electrodeposición metálica	45
3.1.1.	Principios de funcionamiento.....	45
3.1.2.	Recubrimiento de piezas	47
3.1.2.1.	Recubrimiento parcial de una pieza	47

	3.1.2.2.	Recubrimiento total de una pieza	48
	3.1.2.3.	Recubrimiento de piezas irregulares ...	48
	3.1.2.4.	Recubrimiento exterior e interior	49
	3.1.3.	Diseño y ensamble del módulo de electrodeposición metálica	50
3.2.		Tanque de baño	50
	3.2.1.	Dimensiones	51
3.3.		Elección y posición del cátodo	52
	3.3.1.	Criterio de selección	52
	3.3.2.	Propiedades	53
	3.3.3.	Dimensiones	54
	3.3.4.	Posición	55
3.4.		Elección y posición del ánodo	56
	3.4.1.	Criterio de selección	56
	3.4.2.	Propiedades	57
	3.4.3.	Dimensiones y diseño	59
3.5.		Sistema de sujeción	60
3.6.		Fuente de corriente	61
3.7.		Electrolito	62
	3.7.1.	Reactivos	63
		3.7.1.1. Agua destilada	63
		3.7.1.2. Sulfato de cobre pentahidratado	64
		3.7.1.3. Ácido sulfúrico	66
	3.7.2.	Preparación de soluciones	68
4.		ENSAYO DE COBRIZADO	71
	4.1.	Descripción	71
		4.1.1. Aplicaciones	71
	4.2.	Procedimiento	72

4.2.1.	Preparación de la pieza a recubrir.....	72
4.2.2.	Preparación de la superficie.....	73
4.2.3.	Preparación del electrolito.....	76
4.2.4.	Metodología para la obtención del recubrimiento....	77
4.3.	Resultados.....	81
CONCLUSIONES.....		87
RECOMENDACIONES.....		89
BIBLIOGRAFÍA.....		91
APÉNDICES.....		93

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Efectos de la corrosión.....	2
2.	Corrosión galvánica.....	7
3.	Corrosión intergranular.....	14
4.	Corrosión por picadura.....	15
5.	Corrosión selectiva.....	16
6.	Corrosión por esfuerzos	17
7.	Corrosión por fatiga.....	17
8.	Grieta inducida por hidrógeno	18
9.	Corrosión por cavitación.....	19
10.	Corrosión uniforme.....	20
11.	Decapado químico	25
12.	Recubrimiento por electrólisis	26
13.	Proceso de galvanizado	28
14.	Metalización de zinc.....	29
15.	Protección catódica de tubería enterrada con un ánodo de sacrificio ..	31
16.	Elementos que intervienen en un proceso electrolítico	37
17.	Simbolización de revestimientos en galvanotecnia	39
18.	Principio de funcionamiento	46
19.	Configuración de un cátodo y un ánodo para trabajos sencillos.	47
20.	Configuración de dos ánodos equidistantes.....	48
21.	Configuración de dos ánodos para piezas redondas o con forma irregular	49

22.	Configuración de los ánodos para recubrir una pieza tubular, interior y exteriormente	50
23.	Tanque de baño o cuba para de plástico	51
24.	Dimensiones del tanque	52
25.	Probetas de acero SAE 1045	53
26.	Dimensiones del cátodo.....	55
27.	Posición del cátodo en el módulo de electrodeposición.....	55
28.	Cobre laminado, 99,9 por ciento de pureza	57
29.	Diseño del ánodo	59
30.	Dimensiones del ánodo	60
31.	Lagartos de electricidad.....	60
32.	Fuente de voltaje variable análoga	62
33.	Agua destilada	64
34.	Sal de sulfato de cobre pentahidratado	65
35.	Ácido sulfúrico.....	66
36.	Solución de sulfato de cobre.....	68
37.	Solución de ácido sulfúrico	69
38.	Elementos para cobrizar un metal	71
39.	Mecanizado de la pieza a recubrir	72
40.	Pieza al final del mecanizado	73
41.	Pieza a recubrir pulida	74
42.	Desengrase químico	75
43.	Decapado de piezas	76
44.	Electrolito final. Disolución de solución madre	77
45.	Montaje del módulo de electrodeposición metálica	78
46.	Proceso de cobrizado	79
47.	Secuencia de pasos para realizar un cobrizado	80
48.	Depósito de cobre oxidado	81
49.	Depósitos de cobre defectuosos.....	83

50.	Depósitos de cobre de buena calidad	85
51.	Probetas ensayadas en el módulo de electrodeposición	86

TABLAS

I.	Serie electroquímica. Potenciales electródicos normales * o estándar E^0 (V) a 25 °C	3
II.	Clasificación de los inhibidores de corrosión.....	22
III.	Electrodepósitos comunes	38
IV.	Propiedades mecánicas y físicas del acero 1045	54
V.	Rangos de composición química	54
VI.	Propiedades físicas y atómicas del cobre	58
VII.	Propiedades físicas y químicas del sulfato de cobre pentahidratado ...	65
VIII.	Propiedades físicas y químicas del ácido sulfúrico	67

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Amperio
GPa	Giga pascal
°C	Grado Celsius
°F	Grado Fahrenheit
g	Gramo
J	Joule
K	Kelvin
Kg/m³	Kilogramo por metro cúbico, medida de densidad
KJ/mol	Kilojulio por mol, correspondiente a energía por cantidad de materia
PSI	Libra-fuerza por pulgada cuadrada
Mn	Manganeso
μm	Micrómetro
ml	Mililitro
mm	Milímetro
Ω	Ohmio, resistencia eléctrica
pulg	Pulgada
S/m	Siemens por metro, mide conductancia eléctrica
u	Unidad de masa atómica unificada
v	Voltios

GLOSARIO

Acero al medio carbono	Aceros con un contenido de carbono menor del 0,60%.
Aforar	Llenar un recipiente hasta una marca circular grabada con precisión sobre el vidrio del material volumétrico para indicar que ese es el volumen determinado.
AISI	American Iron and Steel Institute. Instituto Americano del hierro y el acero.
Aleación	Material de características y propiedades parecidas a las de la un metal, formado por la fusión de dos o más elementos químicos.
Anión	Ion con carga eléctrica negativa, es decir, que ha ganado electrones.
Ánodo	Electrodo por donde entra la corriente eléctrica en el electrolito, el receptor de las cargas eléctricas negativas (aniones).
Beaker	Recipiente de vidrio transparente con forma cilíndrica y boca ancha.

Cátodo	Electrodo o polo negativo de un generador eléctrico, es el electrodo de menor potencial y por el que pasa la energía eléctrica.
Catión	Ion, sea átomo o molécula con carga eléctrica positiva, es decir, que ha perdido electrones.
Cilindrado	Es una operación realizada en el torno mediante la cual se reduce el diámetro de la barra de material que se está trabajando.
Cobrizado	Proceso electrolítico que consiste en aplicar una película de cobre rojo sobre materiales ferrosos.
Corrosión	Destrucción gradual de los materiales, (usualmente metales), mediante reacción química con el medio ambiente.
Disolución	Describe un sistema en el cual una o más sustancias están mezcladas o disueltas en forma homogénea en otra sustancia.
Electrodeposición	Proceso electroquímico de chapado donde los cationes metálicos contenidos en una solución acuosa se depositan en una capa sobre un objeto conductor.
Electrodepósito	Depósito catódico obtenido por el paso de una corriente eléctrica en una celda electrolítica.

Electrodo	Extremo de un cuerpo conductor en contacto con un medio del que recibe o al que transmite una corriente eléctrica.
Electrolito	Sustancia que contiene iones libres, los que se comportan como un medio conductor eléctrico.
Electroquímica	Rama de la química que estudia la transformación entre la energía eléctrica y la energía química.
Galvanotecnia	Rama tecnológica que agrupa a aquellos procesos en los que se logra depositar una capa metálica continua y adherente, sobre la superficie de un conductor inmerso en un electrólito, con el uso de la corriente eléctrica
Ion	Un átomo o molécula que perdió su neutralidad eléctrica por que ha ganado o perdido electrones
Laminado	Proceso de conformación plástica en el que se reduce el espesor inicial del material trabajado mediante fuerzas de compresión.
Maquinado	Proceso mediante el cual se remueve material de una pieza básica para darle forma y hacerla útil.
Mezcla homogénea	Aquella cuyos componentes no se pueden identificar a simple vista, sino que se ven como una sola fase física.

Orín	Capa de color rojizo que se forma en la superficie del hierro y otros metales a causa de la humedad o del aire.
Oxidación	Reacción química donde un metal o un no metal, cede electrones, y por tanto aumenta su estado de oxidación.
Pasivación	Formación de una película relativamente inerte, sobre la superficie de un material (frecuentemente un metal), que lo enmascara en contra de la acción de agentes externos.
pH	Medida de acidez o alcalinidad de una disolución.
Reactivo	Toda sustancia que interactúa con otra en una reacción química que da lugar a otras sustancias de propiedades, características y conformación distinta.
Rectificador	Aparato que convierte una corriente eléctrica alterna en corriente continua.
Refrentado	Operación realizada en el torno mediante la cual se mecaniza el extremo de la pieza, en el plano perpendicular al eje de giro, para crear una superficie plana.

SAE	Society of Automotive Engineers (Sociedad de Ingenieros Automotores).
Sherardización	Consiste en recubrir con una capa protectora de zinc las piezas de acero por medio del calentamiento simultáneo con polvo de zinc.
Silicación	Proceso de saturación de la superficie de las piezas con silicio a altas temperaturas.
Solución	Mezcla de dos o más componentes perfectamente homogénea.
Torno	Máquina herramienta que permite mecanizar piezas de forma geométrica de revolución.

RESUMEN

El mejoramiento de las propiedades superficiales de los materiales es una búsqueda continua y creciente de los distintos sectores industriales. En relación con la corrosión, la modificación de las superficies comprende la aplicación de tecnologías para la obtención de propiedades deseadas que conllevan a la protección de diversos materiales sometidos a diferentes medios agresivos.

De acuerdo a lo anterior se diseña y construye un prototipo de electrodeposición metálica con fines didácticos para realizar ensayos de cobrizado, técnica que consiste recubrir un metal con una capa fina y uniforme de cobre por medio de procesos electroquímicos. Para esto se diseñaron y elaboraron probetas de acero AISI SAE 1045, las cuales fueron preparadas superficialmente por medio de limpieza mecánica y química, con la finalidad de eliminar la posible existencia de residuos sólidos y grasas superficiales antes de realizar los recubrimientos. Las probetas fueron implantadas en una solución electrolítica durante intervalos de tiempo; posteriormente al recubrimiento, las probetas fueron enjuagadas con agua corriente. Finalmente, se analiza mediante Inspección visual y microscopia la superficie de probetas tratadas, con el propósito de establecer la efectividad del recubrimiento.

Se demuestra que el espesor de la capa de cobre depositada sobre el objeto está determinada por el tiempo de exposición, y la cantidad de iones metálicos disponibles en el baño con relación a la densidad de corriente. Entre más largo es el tiempo de exposición del objeto en la solución electrolítica con corriente continua activada, más gruesa es la capa de cobrizado.

OBJETIVOS

General

Diseñar un módulo de electrodeposición metálica por medio de un proceso electrolítico.

Específicos

1. Conocer los elementos necesarios para realizar un recubrimiento por electrodeposición.
2. Definir las variables independientes involucradas en el proceso de oxidación y corrosión que afecta a los metales.
3. Identificar el proceso electroquímico que se aplica en dicho proceso.
4. Evidenciar el funcionamiento del módulo de electrodeposición por medio de ensayos de cobrizado.
5. Inspeccionar la calidad de los recubrimientos de cobre.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se desarrolla dentro de las líneas de investigación de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la FIUSAC, específicamente dentro del proyecto de investigaciones metalúrgicas, con fines de ensayar, no solo como metodología de investigación experimental, sino también tratando de enriquecer el desarrollo de plantas piloto en los laboratorios de la Escuela de Ingeniería Mecánica.

El progreso industrial y tecnológico en Guatemala ha cobrado gran auge en los últimos años en diversos sectores, como: el diseño de máquinas, construcción, alimentarios, entre otros; por lo que el uso del acero se hace más notorio, ya que es un material abundante industrialmente, que cuenta con un gran número de propiedades mecánicas.

Lamentablemente, las condiciones climáticas como la humedad y el aire, inducen una de las mayores formas de desgaste por corrosión y erosión representando una gran amenaza; haciendo que dichas propiedades se pierdan, provocando de esta manera que los elementos de máquinas fallen.

Para minimizar todos estos efectos y lograr que estas piezas tengan mayor tiempo de vida es necesario realizar tratamientos que permitan la durabilidad del mismo, por ejemplo, la electrodeposición metálica, que no es más que el proceso de recubrir con una fina capa metálica la superficie de otro metal con el fin de protegerlo de la corrosión, además de aportar ciertas cualidades mecánicas o simplemente con fines ornamentales.

La corrosión causa un enorme daño en la economía del país. Esto se manifiesta en la pérdida de millones de toneladas de metales en la industria. Dejando de lado estas pérdidas, los óxidos formados como resultado de la corrosión producen contaminación final.

La electrodeposición, también conocida como recubrimiento electroquímico es un proceso electrolítico en el cual se depositan iones metálicos en una solución electrolítica dentro de una parte del sistema que funciona como cátodo. El ánodo está hecho, generalmente del metal que se recubre y, por tanto, funciona como fuente del metal recubierto. Se pasa corriente directa de un transformador de corriente externo entre el ánodo y el cátodo. El electrolito es una solución acuosa de ácidos, bases o sales que conduce corriente eléctrica mediante el movimiento de iones metálicos del recubrimiento en solución. Para resultados óptimos, las partes deben pasar por una limpieza química y mecánica justo antes de la electrodeposición. Los metales para recubrimiento más comunes en la electrodeposición incluyen: zinc, níquel, estaño, cobre y cromo.

El cobrizado es un acabado que se aplica directamente sobre acero para recubrirlo con una capa de cobre y así abaratar costos, ya que por sus propiedades, el cobre juega un rol clave en las industrias del transporte, la electrónica, la construcción, la agricultura, la ingeniería, la salud, la energía y las nuevas tecnologías. Se usa ampliamente como recubrimiento decorativo en acero y zinc, ya que brinda protección ante la corrosión, da un aspecto atractivo a las piezas recubiertas y aumenta la conductividad eléctrica y térmica.

Con base en lo anterior, con fines de investigación científica y didáctica, se diseñó y ensambló un módulo para realizar electrodepósitos de cobre, de

manera que sus efectos sean repetitivos dentro de un rango de parámetros establecidos en los ensayos experimentales.

1. CORROSIÓN

1.1. Definición y conceptos generales

Se define la corrosión, en general, como la destrucción lenta y progresiva de un metal por la acción de un agente exterior. Uno de los factores que limitan la vida de las piezas metálicas en servicio es el ataque químico o físico-químico que sufren en el medio que les rodea.

Se considera ácido a aquella sustancia capaz de liberar un ion de hidrógeno (H^+), también conocido como protón, y base es aquella sustancia que lo acepta en su estructura química. La corrosión tiene lugar porque hay una diferencia de potencial entre objetos que se conectan eléctricamente y la consecuente pérdida de iones del metal en el ánodo da como resultado la corrosión.

En el proceso deben darse cuatro elementos esenciales. Todos deben estar presentes para que la corrosión tenga lugar. Estos elementos son:

- Un electrolito que es un conductor no metálico en el que la corriente es transportada por el movimiento de iones.
- Un ánodo.
- Un cátodo.
- Una conexión entre ánodo y cátodo

Figura 1. **Efectos de la corrosión**



Fuente: <http://metaline.de/img/produkte/k0627.jpg>. Consulta: 23 de mayo de 2013.

1.2. Tipos de corrosión

Antes de analizar los diferentes métodos para contrarrestar los efectos de la corrosión, se deben conocer los diversos tipos de corrosión que existen. Los tipos de corrosión se pueden clasificar de la siguiente manera:

1.2.1. Serie potencial de los metales

Se ha establecido una serie que se denomina serie potencial de los metales, asignando el valor 0 al potencial del denominado electrodo normal del hidrógeno, que consiste en una placa de platino cubierta con negro de platino y sumergida en ácido clorhídrico, en la atmósfera saturada de hidrógeno a la presión de 1 atmósfera. En la serie potencial de los metales hay elementos que son positivos con respecto al hidrógeno, es decir, que tienen mayor potencial, y el lado de la escala en que están situados se llama lado noble. En el extremo

contrario, que se denomina lado activo, están situados los elementos de potencial negativo con respecto al hidrógeno.

Se han obtenido las series electroquímica y galvánica. En la primera se ordenan los metales por sus potenciales de equilibrio con relación al electrodo normal de hidrógeno y solo da una idea sobre el comportamiento frente a la corrosión. Mejor información suministra la serie galvánica, en donde los metales y aleaciones se han ordenado por sus potenciales de disolución. Los metales o aleaciones que figuran en cualquiera de las series con potencial negativo es porque tienen tendencia a emitir iones positivos (se comportan como el ánodo que, por ser positivo, repele a los iones positivos) y se denominan anódicos; por el contrario, los que tienen potencial positivo son catódicos (atraen a los iones positivos, como el cátodo). A este último grupo pertenecen los metales nobles y otros resistentes a la corrosión.

Cuando se juntan metales distintos o se les conecta eléctricamente de cualquier manera, se forma un par galvánico. En todo par galvánico el metal de mayor potencial negativo es anódico con respecto al de menor potencial, que actúa de cátodo. Siempre es el metal más anódico el que se corroe.

Tabla I. **Serie electroquímica. Potenciales electródicos normales * o estándar E⁰ (V) a 25 °C**

Elemento	Electrodo	Reacción electródica	E ⁰ (V)
Oro	Au ⁺² /Au	Au ⁺² + 3e → Au	(+)1,50
Oxígeno	O ₂ /H ₂ O	O ₂ + 4H ⁺ + 4e → H ₂ O	(+)1,23
Platino	Pt ⁺² /Pt	Pt ⁺² + 2e → Pt	(+)1,2
Mercurio	Hg ₂ ²⁺ /Hg	Hg ₂ ²⁺ + 2e → Hg	(+)0,8
Plata	Ag ⁺ /Ag	Ag ⁺ + 1e → Ag	(+)0,8
Cobre	Cu ⁺ /Cu	Cu ⁺ + 1e → Cu	(+)0,52

Continuación de la tabla I.

Oxígeno	O_2/OH^-	$O_2 + 2H_2O + 4e \rightarrow 4OH^-$	(+)0,40
Cobre	Cu^{2+}/Cu	$Cu^{2+} + 2e \rightarrow Cu$	(+)0,345
Hidrógeno**	H^+/H_2	$H^+ + 1e \rightarrow \frac{1}{2} H_2$	0
Hierro	Fe^{+3}/Fe	$Fe^{+3} + 3e \rightarrow Fe$	(-)0,05
Plomo	Pb^{+2}/Pb	$Pb^{+2} + 2e \rightarrow Pb$	(-)0,125
Estaño	Sn^{+2}/Sn	$Sn^{+2} + 2e \rightarrow Sn$	(-)0,135
Níquel	Ni^{+2}/Ni	$Ni^{+2} + 2e \rightarrow Ni$	(-)0,25
Cadmio	Cd^{+2}/Cd	$Cd^{+2} + 2e \rightarrow Cd$	(-)0,40
Hierro	Fe^{+2}/Fe	$Fe^{+2} + 2e \rightarrow Fe$	(-)0,44
Cromo	Cr^{+2}/Cr	$Cr^{+2} + 2e \rightarrow Cr$	(-)0,50
Zinc	Zn^{+2}/Zn	$Zn^{+2} + 2e \rightarrow Zn$	(-)0,76
Titanio	Ti^{+2}/Ti	$Ti^{+2} + 2e \rightarrow Ti$	(-)1,63
Aluminio	Al^{+3}/Al	$Al^{+3} + 3e \rightarrow Al$	(-)1,67
Berilio	Be^{+2}/Be	$Be^{+2} + 2e \rightarrow Be$	(-)1,85
Magnesio	Mg^{+2}/Mg	$Mg^{+2} + 2e \rightarrow Mg$	(-)2,34
Sodio	Na^+/Na	$Na^+ + 1e \rightarrow Na$	(-)2,71
Calcio	Ca^{+2}/Ca	$Ca^+ + 2e \rightarrow Ca$	(-)2,76
Potasio	K^+/K	$K^+ + 1e \rightarrow K$	(-)2,92
Rubidio	Rb^+/Rb	$Rb^+ + 1e \rightarrow Rb$	(-)2,93
Cesio	Cs^+/Cs	$Cs^+ + 1e \rightarrow Cs$	(-)2,94
Litio	Li^+/Li	$Li^+ + 1e \rightarrow Li$	(-)3,02
*Las concentraciones de las especies iónicas son 1mol dm^3 y las presiones parciales de los gases 1atm ($\gg 10^5\text{Pa}$)			
**El potencial normal de electrodo del hidrogeno ($[H^+] = 1\text{mol dm}^3$ y $P_{H_2} = 1\text{atm}$) se toma por convenio $E^0 = 0\text{V}$			

Fuente: BILURBINA ALTER, Luis. Corrosión y protección. p. 26.

Según Cuesta Fernández (2008), el conocimiento del potencial de electrodo es de suma importancia para interpretar los mecanismos de corrosión electroquímica. Su medida permite determinar el grado de polarización del

electrodo e incluso estimar la velocidad de corrosión metálica; conocer si un metal está en estado activo o pasivo; seguir la formación y rotura de películas superficiales; estudiar el efecto sobre el metal de eventuales sustancias inhibitoras o estimuladoras de los procesos de corrosión; establecer las regiones anódicas (en las que el metal se ataca) y las catódicas en grandes estructuras, o entre metales diferentes en contacto, etcétera. Para esto se dice que:

$$E = E_0 + \frac{Rt}{zF} \log a_{\text{Me}^{z+}}$$

Donde:

E = potencial del metal a una actividad de sus iones igual a Me^{z+}

E_0 = potencial normal del metal

F = 96,493 culombios

Z = valencia de los iones

R = constante de los gases

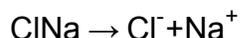
t = temperatura en grados Celsius

$$\text{A } 25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad E = E_0 + \frac{0.059}{z} \log a_{\text{Me}^{z+}}$$

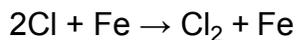
Según dicha relación, un metal se vuelve más activo (más negativo su potencial) al disminuir la concentración de sus cationes, por ejemplo, cuando en el medio existen sustancias formadoras de complejos. Por el contrario, un metal se ennoblesce frente a soluciones cada vez más concentradas de sus iones.

1.2.2. Corrosión galvánica

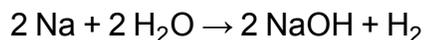
También conocida como corrosión bimetalica. Ocurre cuando dos metales diferentes se acoplan electrolíticamente en presencia de un ambiente corrosivo. Uno de ellos se corroe preferentemente mientras el otro es protegido de dicha corrosión. Cualquier metal se corroe cuando se acopla con otro con un potencial más positivo o más noble en la serie galvánica. Al mismo tiempo, el metal más noble se protege de la corrosión. Si dos metales de distinta tensión galvánica, como el hierro y el cobre, puestos en contacto, se sumergen en una solución de cloruro sódico, la sal se ioniza según la ecuación:



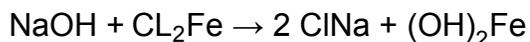
Los iones Cl^- van al ánodo (positivo), formado por el hierro, al contacto con él se descargan y lo ataca, formando cloruro ferroso.



Los iones Na^+ van al cátodo (negativo), formado por el cobre, donde se descargan y reacciona con el agua.

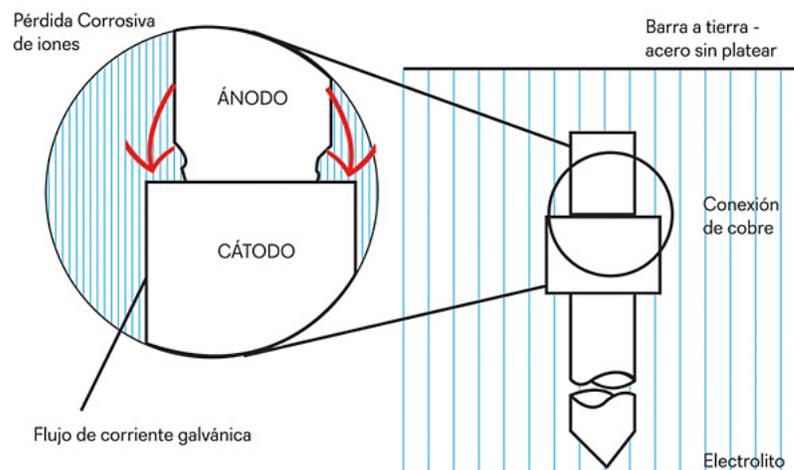


La sosa (NaOH) reacciona sobre el cloruro ferroso, dando hidróxido ferroso.



El hidróxido ferroso $(OH)_2Fe$ se oxida con el oxígeno disuelto en la solución y se transforma en orín, producto muy complejo de composición variable y cuyo constituyente fundamental es el óxido férrico hidratado $Fe_2O_3H_2O$.

Figura 2. **Corrosión galvánica**



Fuente: <http://constructorelectrico.com/home/wp-content/uploads/2012/10/Corrosion-galvanica.jpg>. Consulta: 30 de mayo de 2013.

1.2.3. **Corrosión electrolítica**

En los casos de corrosión electroquímica hasta ahora considerados, ha sido el propio metal o dos metales en contacto o muy próximos los que han proporcionado la fuerza electromotriz para la corrosión electroquímica. Por esto la velocidad de ataque, y por tanto la corrosión, está forzosamente limitada. Pero cuando se aplica una fuerza electromotriz exterior, las velocidades pueden ser mucho mayores. En realidad, se forman dos pilas electrolíticas en serie, constituidas por:

Rieles de acero (ánodo) — terreno húmedo — tubos de acero o cubiertas de plomo (cátodo).

Tubos o cubiertas (ánodo) — terreno húmedo — rieles (cátodo).

La corrosión en los rieles no tiene mucha importancia, porque se han de reponer por desgaste antes de que lleguen a debilitarse por corrosión; pero los daños en los tubos pueden llegar a ser muy graves. Un tipo de corrosión parecido a este, ha tenido lugar alguna vez en los edificios de estructura metálica que tenían circuitos eléctricos en contacto con la estructura.

1.2.4. Corrosión química

Si se pone en contacto un metal con un ácido no oxidante en un recipiente cerrado, generalmente serán reemplazados en el ácido los iones de hidrógeno por los iones metálicos hasta restablecer el equilibrio en la siguiente reacción:



Esto ocurrirá cuando el potencial M/M^{++} iguale al potencial $H_2/2H^+$ en la superficie metálica. Para que esto ocurra debe aumentar la concentración de hidrógeno en el líquido, con el consiguiente aumento de presión, en el espacio gaseoso por encima de él. Si el metal está en el lado activo de la serie galvánica, el equilibrio solo se alcanzará cuando la presión se haya hecho muy grande. Si el ataque tiene lugar no en recipiente cerrado sino al aire, el equilibrio será imposible, y el desprendimiento de hidrógeno, y por tanto la reacción, continuará hasta agotarse el metal con desprendimiento de burbujas en los metales más activos y por difusión lenta a través del líquido en los metales menos activos. Las reacciones de corrosión son:

En el cátodo:



En el ánodo:



Estas reacciones pueden verificarse en puntos contiguos y alternativamente en un mismo punto. Si el metal está en el lado noble, como el plomo, la plata, el cobre, etcétera, basta una pequeña concentración de hidrógeno para que cese la reacción, siendo suficiente una presión inferior a la atmosférica para que deje de desprenderse hidrógeno y se interrumpa, por tanto, el ataque del metal con el ácido. El hierro resulta atacado por los ácidos no oxidantes, favoreciendo este ataque la presencia de azufre en forma de sulfuro de hierro o manganeso, debido a un efecto catalizador.

Acción de los ácidos oxidantes: los metales del lado activo se disuelven, en general, en forma de nitratos en el ácido nítrico, produciendo, en lugar de hidrógeno libre, compuestos hidrogenados como el amoníaco (NH_3) y la hidroxilamina (NO_2HO). Los metales del lado noble son atacados por el ácido nítrico (NO_3H), y más violentamente si no se agita el líquido, pues los productos de la reacción obran como catalizadores. El ácido nítrico, además de ácido, es un agente oxidante y puede producir película protectora de óxido férrico (Fe_2O_3) en la superficie del hierro, cesando entonces el ataque porque la película lo protege, aunque se disuelve, pero muy lentamente. Así se establece una lucha entre las propiedades ácidas y oxidantes del reactivo.

1.3. Medios de corrosión

Independientemente del tipo de corrosión que se presente en un metal, se debe considerar el medio al cual está expuesto dicho material. A continuación se describen los diferentes tipos de corrosión en función al medio al que se encuentra expuesto.

1.3.1. Corrosión por medio atmosférico

Más del 50 por ciento de las pérdidas totales por corrosión se deben a la corrosión por el medio ambiente atmosférico. Los factores que influyen en la velocidad de corrosión son:

- Humedad del aire
- Presencia de gases
- Presencia de polvo

El grado de corrosión de la atmósfera depende de la combinación de los factores de contaminación y de las condiciones climáticas. Los ambientes atmosféricos pueden ser industriales, marinos, urbanos y rurales dependiendo del grado de contaminación y naturaleza de los contaminantes.

1.3.2. Corrosión por agua o humedad

La corrosión de este tipo se debe a la presencia del oxígeno y cloro disuelto. Las variables más importantes que afectan a la corrosión por el agua de mar son:

- Velocidad del agua
- Temperatura
- Contenido en oxígeno

Aumentando con el contenido de oxígeno y con la temperatura, la corrosión del acero y del hierro se caracteriza por los siguientes factores:

- Temperatura: la velocidad de corrosión se duplica cada 30 °C de aumento de temperatura.
- Concentración de cloro y oxígeno: la velocidad de corrosión es proporcional al contenido de oxígeno y cloro.
- Contenido de carbonato cálcico (CaCO_3): la presencia de esta sustancia reduce la velocidad de corrosión, ya que la alcalinidad cálcica en el agua produce una protección sobre las paredes.
- pH del medio: la velocidad de corrosión se reduce con un pH fuertemente alcalino, mientras que con un pH fuertemente ácido avanza a gran velocidad.

1.3.3. Corrosión por el tipo de terreno

Un trozo de metal situado en un terreno se comporta como una pila galvánica. La corrosión es debida a un proceso electroquímico donde el terreno se comporta como electrólito y las distintas áreas del metal son los ánodos y cátodos de las pilas electrolíticas. Por las diferentes características del terreno, se producen en el metal dos zonas de diferente potencial eléctrico, generándose así una corriente eléctrica continua. Las características del electrólito (el terreno) influyen sobre la corrosión en los siguientes aspectos:

- Densidad: con valor menor de $1,5 \text{ g/cm}^3$.
- Aireación: con buena aireación la agresividad es mínima, pero si existe aireación diferencial con el terreno circundante la agresividad es de importancia considerable.
- Composición química: los sulfatos y cloruros son perjudiciales, mientras que los carbonatos son beneficiosos.
- Microorganismos: algunas bacterias transforman los sulfatos en sulfuros ferrosos, por lo que corroen el material.

1.4. Factores que influyen en la corrosión

Los principales factores a considerar en el estudio de las protecciones contra la oxidación y la corrosión son los siguientes:

- Clase y estado del metal: evidentemente hay que tener en cuenta, en primer lugar, la clase de metal y el estado en que se encuentra. Para esto hay que conocer su composición química, su constitución, estructura, impurezas que contiene, procedimientos de elaboración, tratamientos térmicos a que ha sido sometido, tratamientos mecánicos, etc.
- Estado de la pieza: destaca el estado de la superficie (los surcos de mecanizado, rayas, grietas, orificios, etc., favorecen la corrosión; por el contrario, un pulido perfecto la dificulta), su radio de curvatura y orientación con relación a la vertical, naturaleza de las piezas en contacto y esfuerzos a que está sometida (los de tracción la favorecen).
- Medio en que se encuentra: el ataque al metal partirá del medio en que se encuentra, y, por tanto, cuanto mejor se conozca, más fácilmente será

prever la clase de corrosión que se puede producir y los medios de evitarla. Sobre el medio conviene conocer su naturaleza química, su concentración, el porcentaje de oxígeno disuelto, el índice de acidez (Ph), presión, temperatura, etc.

- Clase de contacto entre el metal y el medio en que se encuentra: el contacto entre el metal y el medio en que se encuentra queda definido por la forma de la pieza, estado de la superficie, condiciones de inmersión, etc.

1.5. Formas de manifestación de la corrosión

Como se expresa en la definición de corrosión, ésta se presenta solamente en metales. Por lo mismo, es conveniente conocer las diversas formas en las que puede manifestarse la corrosión.

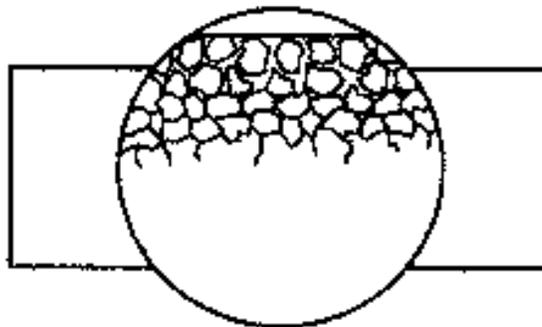
1.5.1. Localizada

Es aquella que tiene lugar en zonas determinadas del metal, repartidas desigualmente, y progresando de modo irregular. El metal queda picado, terminando en general por quedar con grandes rugosidades en su superficie. En este caso, la capacidad de deformación del metal disminuye más rápidamente de lo que podía esperarse por la pérdida de masa. Dentro de este grupo se puede distinguir entre:

- Corrosión intergranular: se define como un deterioro adyacente a los límites de granos por los que está compuesta una aleación. Afecta a la unión de los granos de los constituyentes de los metales, debilitando la resistencia del conjunto de tal manera que a veces fallan las piezas al

menor esfuerzo, sin que exteriormente se observe ninguna alteración de la superficie. El ataque se localiza y progresa entre los bordes de los granos (las impurezas los hacen anódicos con relación a los mismos granos, que son catódicos) y se pierde la cohesión entre ellos. Está motivado por el funcionamiento de micropilas galvánicas entre el material del mismo borde y el del interior del grano. La cantidad de metal corroído suele ser extremadamente pequeña. En cambio, la pérdida de resistencia mecánica es considerable a consecuencia de las múltiples grietas que dañan el metal. Es el tipo de corrosión más peligrosa. En algunos casos el metal se desintegra completamente sin que su aspecto exterior se altere ni haya pérdidas aparentes de peso.

Figura 3. **Corrosión intergranular**



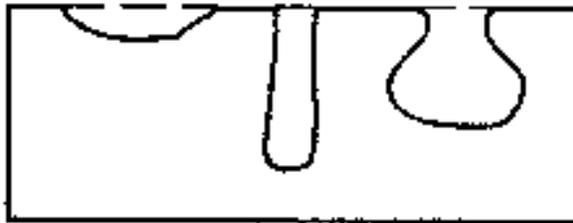
Fuente: FI. U.N.L.P. Módulo VIII- Corrosión. <http://www.ing.unlp.edu.ar/quimica/corrosion.htm>

Consulta: 30 de mayo de 2013.

- Por picadura: ciertos metales y aleaciones (aluminio, acero inoxidable, etc.), que deben su estabilidad a delgadas películas pasivadoras de óxido, son los más propensos a desarrollar picaduras. Estas se originan en las imperfecciones superficiales y en los lugares expuestos a daño mecánico, bajo condiciones en que la película es incapaz de

regenerarse. Se entiende por picadura una cavidad o agujero con el diámetro de la superficie igual o menor que su profundidad. Las picaduras, que pueden ser superficiales o muy profundas, comienzan a formarse en aquellas zonas del metal en las que se produce un aumento local de las velocidades de corrosión. Constituyen una forma muy insidiosa de corrosión, a pesar de que la cantidad de metal atacado es pequeña, el perjuicio puede ser grande.

Figura 4. **Corrosión por picadura**

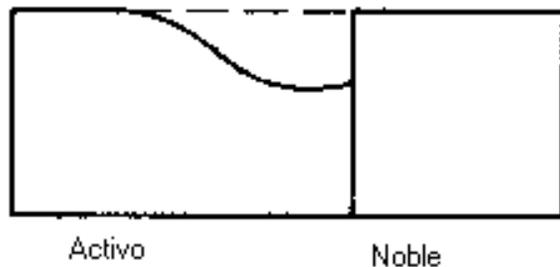


Fuente: FI. U.N.L.P. Módulo VIII- Corrosión. <http://www.ing.unlp.edu.ar/quimica/corrosion.htm>

Consulta: 30 de mayo de 2013.

- Selectiva: se presenta en aleaciones en las que los elementos aleantes difieren bastante entre sí por sus potenciales electroquímicos. El elemento más electronegativo, que será el más activo y por tanto el ánodo, se disuelve quedando una estructura esponjosa de malas propiedades mecánicas

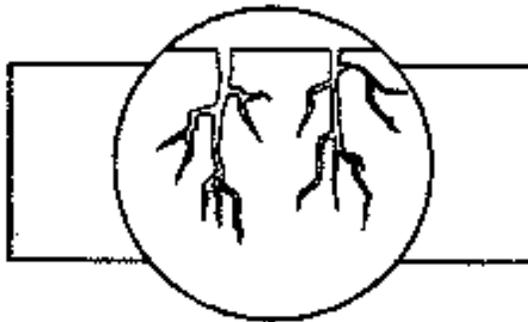
Figura 5. **Corrosión selectiva**



Fuente: FI. U.N.L.P. Módulo VIII- Corrosión. <http://www.ing.unlp.edu.ar/quimica/corrosion.htm>
Consulta: 30 de mayo de 2013.

- Corrosión por grietas: es un tipo de ataque localizado intenso que frecuentemente ocurre dentro de pequeñas grietas y zonas ocultas del metal expuesto a ambientes corrosivos. Este tipo de corrosión está fuertemente asociado a la presencia de pequeños volúmenes de soluciones estancadas en orificios y juntas en la superficie.
- Corrosión por esfuerzos: esta forma de corrosión ocurre en materiales y/o aleaciones sometidos a esfuerzos de tensión y expuestos a determinados ambientes. Este tipo de ataque da lugar a grietas que provocan la rotura del metal. Generalmente se originan perpendiculares al esfuerzo aplicado.

Figura 6. **Corrosión por esfuerzos**



Fuente: FI. U.N.L.P. Módulo VIII- Corrosión. <http://www.ing.unlp.edu.ar/quimica/corrosion.htm>
Consulta: 30 de mayo de 2013.

- Corrosión por fatiga: ocurre bajo esfuerzos cíclicos en determinadas condiciones ambientales, dando como resultado grietas que se propagan desde la superficie en dirección perpendicular al esfuerzo. Además del ambiente corrosivo al que esté expuesto el material, la frecuencia de los esfuerzos cíclicos influye directamente en la corrosión por fatiga.

Figura 7. **Corrosión por fatiga**



Fuente: FI. U.N.L.P. Módulo VIII- Corrosión. <http://www.ing.unlp.edu.ar/quimica/corrosion.htm>
Consulta: 30 de mayo de 2013.

- Corrosión por daño de hidrógeno: es causada por la difusión del hidrógeno en el metal o aleación, según la reacción, este fenómeno provoca roturas que se propagan por la superficie del metal.

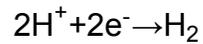
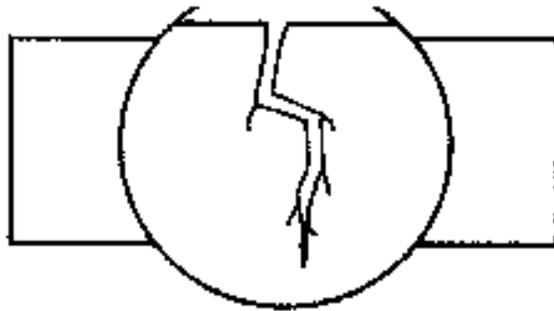


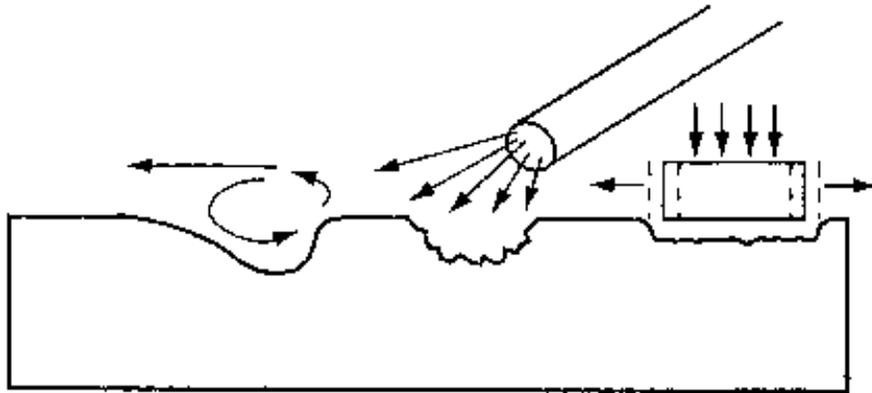
Figura 8. **Grieta inducida por hidrógeno**



Fuente: FI. U.N.L.P. Módulo VIII- Corrosión. <http://www.ing.unlp.edu.ar/quimica/corrosion.htm>
Consulta: 30 de mayo de 2013.

- Corrosión por cavitación: tiene lugar donde la velocidad es tan elevada que la presión en la corriente del flujo es suficiente para formar burbujas de vapor de agua, que colisionan con la superficie del metal. Este choque da lugar a un ataque en forma de picaduras sobre la superficie del metal.

Figura 9. **Corrosión por cavitación**



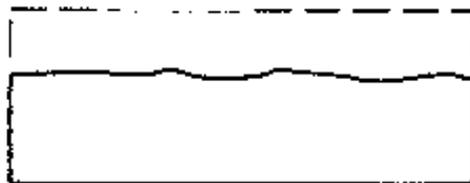
Fuente: FI. U.N.L.P. Módulo VIII- Corrosión. <http://www.ing.unlp.edu.ar/quimica/corrosion.htm>

Consulta: 30 de mayo de 2013.

1.5.2. Uniforme

El metal es atacado química o electroquímicamente sufriendo una pérdida de superficie. El ataque se extiende casi por igual por toda la superficie, siendo en determinadas zonas más localizado con mayor pérdida de metal. Aun siendo uniforme, si el medio es muy agresivo en poco tiempo la disminución del espesor en el objeto metálico es tal que se pierden sus características mecánicas, por lo tanto, en muy pocas ocasiones es recomendable utilizar un metal sin ninguna protección dejándolo a corrosión libre y, cuando se hace, no hay que olvidar sobredimensionar de forma adecuada. La resistencia mecánica decrece proporcionalmente a la disminución de espesor.

Figura 10. **Corrosión uniforme**



Fuente: FI. U.N.L.P. Módulo VIII- Corrosión. <http://www.ing.unlp.edu.ar/quimica/corrosion.htm>
Consulta: 30 de mayo de 2013.

1.5.3. Ley de Faraday

La ley de Faraday constituye el principio fundamental de la electrólisis. Con la ecuación de esta ley se puede calcular la cantidad de metal que se ha corroído o depositado uniformemente sobre otro, mediante un proceso electroquímico durante cierto tiempo, y se expresa en los siguientes enunciados:

La cantidad de cualquier elemento (radical o grupo de elementos) liberada, ya sea en el cátodo o en el ánodo durante la electrólisis, es proporcional a la cantidad de electricidad que atraviesa la solución.

$$m = \frac{I \times t \times M}{n \times F}$$

Donde:

m = cantidad de metal que se ha corroído o depositado [g]

I = densidad de corriente en [A]

t = tiempo en segundos [s]

M = masa atómica del metal [g/mol]

n = valencia del metal

F = constante de Faraday 96.540 Cul. O 96500 [A.s/mol]

Las cantidades de elementos o radicales diferentes liberados por la misma cantidad de electricidad, son proporcionales a sus pesos equivalentes.

1.5.4. Combinada

En la práctica, casi siempre se presentan juntos ambos tipos de corrosión: uniforme y localizada, si bien predomina alguno de ellos.

1.6. Métodos de protección contra la corrosión

La lucha contra la corrosión es un problema muy complejo debido al gran número de factores que entran en juego; por tanto, cada caso específico requiere un tratamiento particular y no es posible encontrar soluciones generales. Para evitar la corrosión es importante saber seleccionar adecuadamente los materiales, por ello deberá tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

- Conocer el proceso de actuación de los agentes corrosivos presentes que pueden dar lugar a la corrosión.
- Tomar en cuenta que para la protección contra la corrosión pueden utilizarse más de un material.
- Realizar las pruebas necesarias para comprobar que la selección escogida es la más idónea.
- El análisis económico será una etapa más del proceso de selección.

1.6.1. Modificación del medio

Son clásicos, dentro de estos métodos están los siguientes:

- Deshumidificación del aire
- Desaireación del agua
- Adición de inhibidores de corrosión

En un buen número de procesos de corrosión electroquímica se establece la intervención del agua (electrolito) y del oxígeno (reactivo catódico). La eliminación de uno u otro de estos elementos, necesarios para la corrosión, conlleva la supresión del proceso corrosivo. Los inhibidores se utilizan, principalmente en sistemas que utilizan un volumen constante de disolución del metal.

Tabla II. Clasificación de los inhibidores de corrosión

Composición química	Actuación	Circunstancias de aplicación
Orgánicos	Anódicos	De decapado
Inorgánicos	Catódicos	Para soluciones alcalinas y de cloruros
	De absorción	En fase de vapor
		Agua potable y de calderas
		Anticongelantes
		Productos petrolíferos y pinturas
		Grasas, aceites lubricantes y de corte
		Hormigón armado

Fuente: elaboración propia, con datos de GONZALES FERNÁNDEZ, Jose. Teoría y práctica de la lucha contra la corrosión.

1.6.2. Modificación del diseño

Hay factores que se pueden evitar con un diseño adecuado del equipo o estructura metálica. Como normas básicas se debe evitar el contacto directo entre metales de muy distintas características electroquímicas.

1.6.3. Recubrimientos metálicos

Uno de los procedimientos más empleados contra la oxidación y corrosión es el recubrir la superficie que se desea proteger con una capa de metal autoprotector lo más compacta y adherente posible. Si el metal protegido es menos electronegativo (catódico) que el protector (anódico), la protección tiene lugar aun en el caso de agrietamiento o descascarillado de la capa protectora. Lo contrario sucede si el recubrimiento es catódico, requiriéndose en este caso un recubrimiento perfecto, sin porosidad. La elección del metal empleado en el recubrimiento se hace de acuerdo con el metal que se ha de proteger, del objeto de que se trata y del espesor que se proyecta dar a la capa protectora. Los recubrimientos metálicos pueden aplicarse por varios procedimientos: electrólisis, inmersión en el baño del metal protector, metalización, cementación y chapado. Antes de proyectar un metal sobre una superficie, debe someterse esta a una preparación previa, para obtener una buena adhesión del metal proyectado, se clasifican en:

- Orgánicos
- Inorgánicos
- Metálicos
- Por películas pasivas

1.6.3.1. Preparación de la superficie

Cualquiera que sea el recubrimiento que se adopte, debe desengrasarse previamente la pieza con un disolvente apropiado, como sosa cáustica, tricloroetileno, benceno, etc. Después se elimina el orín y cascarilla de la superficie del metal sometiéndolo a un decapado.

- Decapado: la eliminación de la capa de laminación y del orín en la superficie de las piezas de acero, es absolutamente necesaria antes de aplicar un recubrimiento de cualquier clase. Esta eliminación se efectúa por medio de una operación que se denomina decapado, que puede efectuarse por procedimientos mecánicos, químicos y electrolíticos. Todos estos en la superficie para pintar o recubrir.
 - Decapado mecánico: la limpieza de la superficie de las piezas puede realizarse con cepillos de alambre, que limpian bastante la cascarilla y el orín, pero que siempre dejan residuo, que queda brillante por el frotamiento del cepillo, lo que da apariencia de que el metal ha quedado completamente limpio. El chorro de arena realiza una limpieza bastante perfecta. El chorro de arena proyectado por aire comprimido se emplea con dos fines:
 - Limpiar la superficie de la pieza.
 - Creación de rugosidades que favorecen la adherencia del metal proyectado.
 - Decapado químico: es el procedimiento más empleado, sobre todo como operación previa para el galvanizado y estañado. Se realiza sumergiendo la pieza en ácido sulfúrico diluido al 10 por ciento a

unos 80 grados centígrados, durante cinco minutos, o en ácido clorhídrico en frío, al 20 por ciento, ayudando alguna vez, aunque no es frecuente, a levantar la cascarilla raspando la superficie de la pieza.

- Decapado electrolítico: puede realizarse haciendo actuar los objetos de acero como ánodos en una solución de ácido sulfúrico al 30 por ciento que contiene bicromato potásico. La densidad eléctrica utilizada es de unos 10 amperios por decímetro cuadrado.

Figura 11. **Decapado químico**



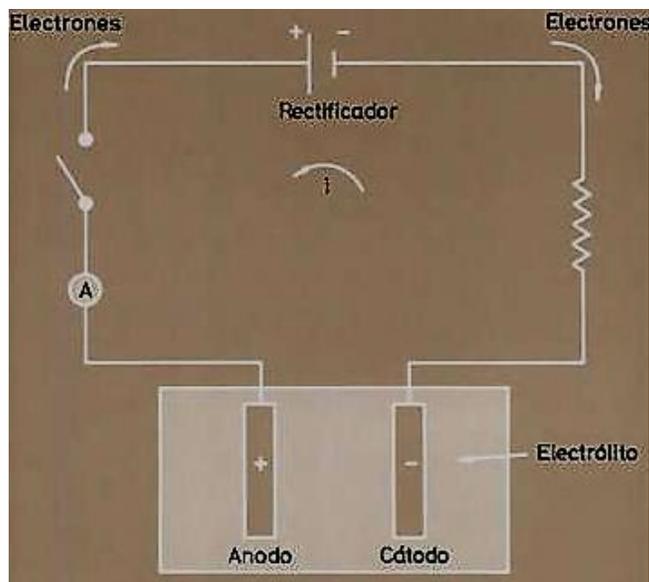
Fuente: ORTEGA MAIQUEZ, José Antonio. Corrosión industrial. p. 30.

1.6.3.2. Recubrimientos por electrólisis

Se obtienen películas de metal protector utilizando este como ánodo, y las piezas que se desea recubrir, como cátodos, y empleando un electrolito de una solución del metal que se ha de depositar en forma de sulfatos o cianuros con adición de algunas sustancias orgánicas.

La pieza actúa de cátodo en una cuba electrolítica y sobre ella se deposita el metal protector. Ejemplo: niquelado, cobrizado, cromado, dorado, plateado, etc. Los principales metales autoprotectores que se depositan electrolíticamente son: el cobre, el níquel y el cromo, y alguna vez el cinc, el cadmio y el latón. También se depositan electrolíticamente el oro, la plata, el vanadio y el rodio, aunque estos metales tienen a veces más interés decorativo que protector. El espesor de las películas es del orden de 0,001 a 0,01 milímetros.

Figura 12. Recubrimiento por electrólisis



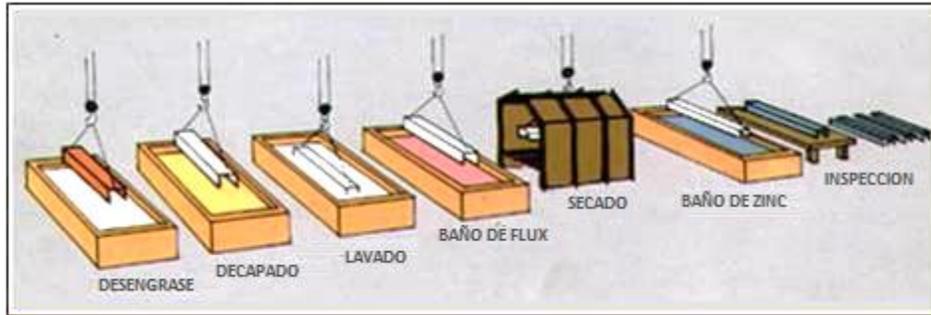
Fuente: ORTEGA MAIQUEZ, José Antonio. Corrosión industrial. p. 11.

1.6.3.3. Recubrimientos por inmersión en baño de metal fundido

Consiste en sumergir la pieza que se desea proteger durante breve tiempo en un baño de metal protector fundido. A la salida del baño se somete a la pieza a una especie de enjuagado que disminuye y, sobre todo, uniformiza el espesor de la capa del metal adherido. Los recubrimientos de este tipo más utilizados son el galvanizado y el estañado.

- Galvanizado: es el recubrimiento del acero con cinc. El hierro es catódico respecto al cinc, por lo tanto, quedará protegido aunque se produzca un poro o fisura en la capa protectora, pero a costa del cinc, que sufrirá la corrosión. Por esto debe ser la capa de cinc gruesa, por lo menos de 0,05 gramos por centímetro cuadrado de superficie, si se quiere que la protección sea efectiva.
- Estañado: es un procedimiento de protección de los metales por inmersión en un baño de estaño fundido. El estaño se aplica preferentemente para la fabricación de hojalata, que es acero suave calmado, con una película de estaño en cada cara de unos 0,005 milímetros. El estaño es catódico con respecto al acero y, por tanto, en los poros o fisuras del recubrimiento se producirá una corrosión del metal base más intensa que si estuviese el metal desnudo.

Figura 13. **Proceso de galvanizado**



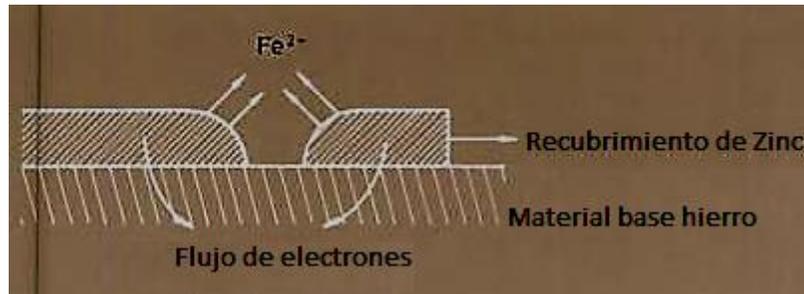
Fuente: HERNÁNDEZ LARA, Derlis. Galvanizado <http://derlishl.weebly.com/el-proceso-de-galvanizado.html>. Consulta: 15 de junio de 2013.

1.6.3.4. Recubrimientos por metalización

La metalización se emplea cada día más, tanto para trabajos de reparación como para piezas de nueva construcción, pudiendo citar, entre otras, las siguientes aplicaciones:

- Recargues de ejes o piezas desgastadas.
- Reparación de defectos en piezas fundidas.
- Protección de piezas contra el desgaste, con la aportación de metales más duros que el metal base.
- Protección de piezas contra la corrosión atmosférica o de los ácidos.
- Mejora del acabado de las piezas por aplicación de níquel, cromo-níquel, etc.
- Fabricación de moldes y de electrodos para electroerosión.
- Aplicaciones decorativas.

Figura 14. **Metalización de zinc**



Fuente: ORTEGA MAIQUEZ, José Antonio. Corrosión industrial. p. 29.

1.6.3.5. **Recubrimientos por cementación**

La cementación empleada para la protección contra la corrosión no debe confundirse con el tratamiento térmico de este nombre, aunque la operación es similar, pues se trata de alear la capa superficial del metal con otro más noble y resistente a la corrosión. Pero así como en la cementación empleada como tratamiento térmico, el fin de la aleación es aumentar la dureza de la capa superficial, en la cementación empleada para la protección contra la oxidación y corrosión se trata de obtener una capa autoprotectora. Se calientan las piezas que se desean proteger, en presencia de polvo del metal protector, se crea por difusión una capa superficial resistente. Cuatro son los procedimientos de cementación más empleados: sherardización, cromización, calorización y silicación.

1.6.3.6. Recubrimientos por chapado

El chapado o plaqueado consiste en superponer placas de un metal noble por una o las dos caras del metal que se desea proteger. La operación se realiza laminando las chapas de acero junto con las del metal protector, produciéndose una difusión de los metales en la zona de contacto.

1.6.4. Modificación del metal base

Cuando se añaden elementos a un metal base pueden variar las posibilidades de su empleo frente a determinadas situaciones. En ocasiones puede ser conveniente cambiar completamente la composición del metal, en vez de añadir elementos aleantes para conseguir mejores resultados, por ejemplo, la sustitución de una tubería de acero por otra de cobre.

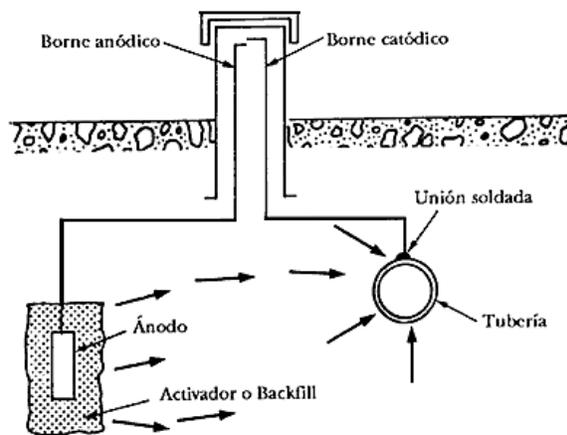
1.6.5. Polarización electroquímica

Suelen ser económicas, de ahí su gran utilización. Las técnicas más importantes son:

- Protección anódica: mantienen el metal que están protegiendo en condición anódica, pero con la tensión suficiente para que sea posible la pasivación del metal, disminuyendo así su velocidad de corrosión. Se ha utilizado con éxito en recipientes de acero inoxidable para ácido sulfúrico.

- Detección catódica: con una fuente exterior de tensión hacen más electronegativo el metal que protegen, teniendo en cuenta que la corrosión electroquímica es solo factible en las zonas anódicas, y que estas quedan eliminadas de la superficie, favorecida por dicho sistema de protección. Se suele utilizar en tuberías enterradas.

Figura 15. **Protección catódica de tubería enterrada con un ánodo de sacrificio**



Fuente: Biblioteca Digital del ILCE.

http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/sec_10.htm.

Consulta: 05 de junio de 2013.

2. PRINCIPIOS DE ELECTRODEPOSICIÓN

2.1. Definición de electrodeposición

La electrodeposición es el método de cubrir objetos con una película fina de otro metal. El principio que rige este fenómeno es la electrólisis. La electrodeposición implica la reducción (disminución del estado de oxidación; ganancia de electrones) de un compuesto metálico disuelto en agua y una deposición del metal resultante sobre una superficie conductora. Probablemente esta técnica es uno de los procesos más complejos conocidos, debido a que hay un gran número de fenómenos y variables que intervienen en el proceso total, mismos que son llevados a cabo en la superficie de los materiales involucrados. En la electrodeposición de metales, el éxito de la operación está en función del control de los fenómenos involucrados, por lo que es necesario mencionar los principios a los que se sujetan estos, ya que cualquier variación en el proceso se verá reflejada de manera significativa en el resultado obtenido

2.2. Principios de electroquímica

La electroquímica es la ciencia que estudia el intercambio de energía química y eléctrica que se produce por medio de una reacción de óxido-reducción. La oxidación es la pérdida de electrones, mientras la reducción es la ganancia de los mismos. Las reacciones de óxido-reducción (rédox), son aquellas en donde hay una transferencia de uno o más electrones.

Electrólisis es el nombre que recibe el proceso mediante el cual la energía eléctrica se emplea para producir cambios químicos; a través de una reacción redox no espontánea, donde se hace pasar una corriente eléctrica. A continuación se menciona la definición de algunos términos empleados en el proceso de electrodeposición:

- Electrodepósito: es el depósito catódico obtenido por el paso de una corriente eléctrica en una célula electrolítica.
- Electrodo: es el componente de un circuito eléctrico que conecta el cableado del circuito a un medio conductor como un electrolito. El electrodo positivo es llamado ánodo y el electrodo negativo es llamado cátodo.
- Electrolito: es la sustancia iónica que en solución se descompone al pasar la corriente eléctrica.

2.3. Principios de electricidad

Los procesos electrolíticos implican variables eléctricas que es conveniente tomar en cuenta en el diseño de un módulo de electrodeposición metálica:

- Corriente eléctrica (I): es la rapidez del flujo de carga que pasa por un punto dado en un conductor eléctrico, que se origina por el movimiento de los electrones y, es una medida de la cantidad de carga que pasa por un punto dado en la unidad de tiempo. Se mide en amperes (A).

- Diferencia de potencial o voltaje (V): cuando una corriente eléctrica fluye a través de un alambre conductor, se dice que lo hace porque existe una diferencia de potencial entre los dos extremos del alambre. La diferencia de potencial entre dos puntos se define como el trabajo efectuado, medido en joules (J), por fuerzas eléctricas para mover una carga de un coulomb desde el punto de mayor potencial hasta el punto de menor potencial. A la unidad con que se mide la diferencia de potencial se le llama volt.
- Resistencia (R): es la oposición al flujo de carga eléctrica, y está presente en todos los elementos. Es una propiedad específica del material, que está en función de sus propiedades como son: el tamaño, forma y temperatura. Es independiente el voltaje y la corriente que pasa a través de ella. La unidad de medida es el Ohm (Ω).

Un aislante es un material que se resiste al flujo de carga a través de sí mismo. Un conductor eléctrico es un material por el cual puede transferirse carga fácilmente, la mayor parte de los metales son buenos conductores, existen diferentes tipos de conductores, clasificados por su naturaleza de conducción:

- Conductores de primer orden: son aquellos que poseen conductancia eléctrica, en los cuales los portadores de la carga son los electrones. Se caracterizan por tener una conducción sin transferencia substancial de masa.
- Conductores de segundo orden: poseen conductancia iónica o electrolítica, y los portadores de la carga son los iones. En este tipo de

conductores se da una transferencia de masa asociada con la conductividad.

- Conductores de tercer orden: llamados comúnmente semiconductores, poseen tanto conductancia iónica como eléctrica. Por lo general, predomina el carácter eléctrico.

La ley de Ohm establece que para un resistor dado a determinada temperatura, la corriente es directamente proporcional al voltaje aplicado; esta proporcionalidad se establece como:

$$R = \frac{V}{I}$$

Donde:

V = voltaje

R = resistencia

I = corriente

Un circuito en serie se define como aquel circuito en el que la corriente eléctrica tiene un solo camino para llegar al punto de partida, sin importar los elementos intermedios. En el caso concreto de arreglos, únicamente de resistencias, la corriente eléctrica es la misma en todos los puntos del circuito.

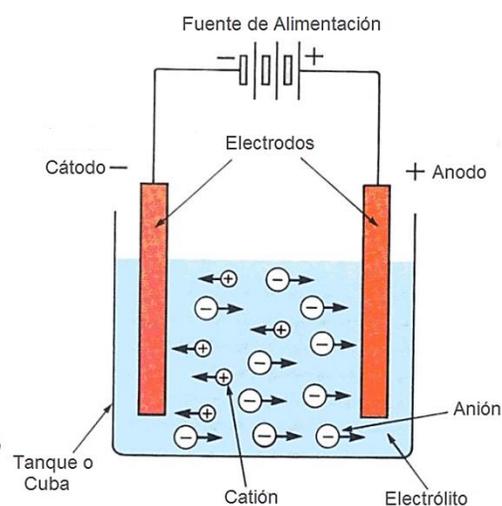
Un circuito en paralelo se define como aquel circuito en el que la corriente eléctrica se divide en cada nodo. Su característica más importante es el hecho que el potencial o voltaje en cada uno de los resistores del circuito, tiene el mismo valor.

Un circuito mixto se define como la combinación de elementos tanto en serie como en paralelo. Para la solución de estos problemas se trata de resolver primero todos los elementos que se encuentran en serie y en paralelo, para finalmente reducirlo a un circuito puro, bien sea en serie o en paralelo.

2.4. Proceso electrolítico

El proceso electrolítico consiste en hacer pasar una corriente eléctrica a través de un electrolito, entre dos electrodos conductores denominados ánodo y cátodo. Donde los cambios ocurren en los electrodos. Cuando se conectan los electrodos con una fuente de energía (generador de corriente directa), el electrodo que se une al polo positivo del generador es el ánodo y el electrodo que se une al polo negativo del generador es el cátodo. Una reacción de electrólisis puede ser considerada como el conjunto de dos medias reacciones, una oxidación anódica y una reducción catódica (figura 16).

Figura 16. Elementos que intervienen en un proceso electrolítico



Fuente: <http://estalella20.net/wp-content/uploads/2012/12/electrolisi.jpg>. Consulta: 20 de junio de 2013.

2.5. Depósitos electrolíticos

A los revestimientos obtenidos a través de un proceso de electrodeposición, se les conoce como depósitos electrolíticos. Estos electrodepuestos pueden estar compuestos de uno o más elementos, cada uno de ellos sobre un metal base, según la aplicación que se desee. En seguida se muestra una tabla que incluye los revestimientos más usados en la industria con su respectivo metal base (tabla III).

Tabla III. **Electrodepósitos comunes**

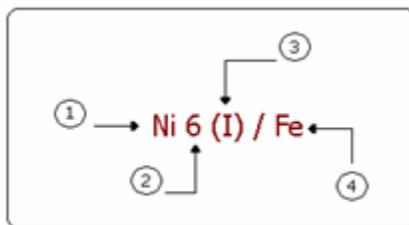
Electrodepósito	Metal base
Cobre-níquel-cromo	Materiales ferrosos
Níquel-cromo	Materiales ferrosos
Zinc	Materiales ferrosos
Cadmio	Materiales ferrosos
Cobre-níquel-cromo	Aleaciones de zinc
Níquel-cromo	Cobre y sus aleaciones
Plata	Cobre y sus aleaciones
Oro	Cobre y sus aleaciones
Oro	Aleaciones de zinc
Estaño	Cobre y sus aleaciones
Estaño	Materiales ferrosos
Níquel	Materiales ferrosos y sus aleaciones
Níquel	Cobre y sus aleaciones
Cromo	Materiales ferrosos

Fuente: DEL CASTILLO RODRÍGUEZ, Felipe. Principios de electrodeposición. p. 11.

2.6. Nomenclatura para electrodeposición

En galvanotecnia existe una nomenclatura que resulta muy útil cuando se requiere de la realización de varias pruebas, pues reduce el tiempo invertido en el registro de los datos, además de facilitar la lectura de los mismos.

Figura 17. Simbolización de revestimientos en galvanotecnia



Fuente: DEL CASTILLO RODRÍGUEZ, Felipe. Principios de electrodeposición. p. 12.

En donde:

- 1 es el símbolo químico del metal o elemento preferencial del revestimiento.
- 2 el espesor del revestimiento metálico para procesos electrolíticos; se expresa en micrómetros μm .
- 3 el proceso de revestimiento, escrito entre paréntesis con número romano, que va de I a X. En este caso I, lo que indica un proceso electrolítico. Los revestimientos más comunes son:
 - (I) Depósito electrolítico
 - (II) Depósito químico
 - (III) Revestimiento por inmersión en metal fundido

- (IV) Revestimiento por metalización a pistola
 - (V) Revestimiento por chapado
 - (VI) Depósitos al vacío
- 4 es el símbolo químico del metal o aleación base, precedido de una línea diagonal.

Según Felipe Díaz del Castillo; en su publicación de 2008, *Principios de electrodeposición*, señala que la electrodeposición es una tecnología muy importante, debido a que permite recubrir materiales baratos y muy accesibles con capas de diferentes metales. No solo se aplica para obtener mejores propiedades, su uso se extiende a múltiples aplicaciones en las cuales, de otra manera, resultaría muy costoso alcanzar estos objetivos, como protección contra la corrosión, mejora de las propiedades mecánicas y acabados estéticos (decoración).

2.7. Factores de relevancia

En ingeniería, ningún material posee todas las propiedades deseadas, sus relativas ventajas y desventajas deben ser consideradas para realizar una correcta decisión. En algunos casos, las propiedades mecánicas son buenas, pero la resistencia química que ofrece el material no es la deseada, por lo tanto el módulo debe contar con una fuente de alimentación que sea capaz de suministrar una corriente continua constante, el material de la instalación o circuito eléctrico debe poseer alta conductividad eléctrica. El tanque para recubrimientos debe estar fabricado con materiales resistentes a la corrosión y golpes, por último debe tener una forma que distribuya de manera homogénea la solución electrolítica.

En el presente diseño se consideró que los ejes a ensayar (cátodos), son de tamaño pequeño, por lo tanto las dimensiones del tanque son reducidas, como se verá más adelante. Esto es una ventaja, ya que el volumen del tanque no es muy grande y en consecuencia se utiliza menor cantidad de electrolito, lo que favorece a una reducción de costos.

De acuerdo a lo anterior, el proceso electrolítico se realizó dentro de un recipiente abierto. Este tanque, llamado cuba, se construyó con las dimensiones adecuadas de acuerdo al tamaño de las piezas a recubrir, debiendo ser inerte, químicamente, al electrolito a utilizar. Una vez llena la cuba con el electrolito se obtiene lo que se conoce como electrolito o baño galvánico. En este electrolito se sumergieron repetitivamente las piezas a recubrir, en soportes adecuados para que queden suspendidas en el electrolito. La finalidad de este proyecto fue diseñar y construir un sistema que permitiera realizar prácticas de electrodeposición con fines didácticos.

2.7.1. Materiales

Los materiales utilizados para la fabricación de los tanques, son: madera, hierro o acero, barro cocido resistente, concreto, vidrios, materiales plásticos, etc. Lo que hace necesaria, en algunos casos, la elección de un forro o revestimiento adecuado. Los materiales frecuentemente utilizados para la construcción de tanques en galvanoplastia son los siguientes:

- Madera: anteriormente fue el material más usado, debido a su bajo costo, especial adaptabilidad para un propósito determinado ya que es fácil su fabricación. Aunque actualmente su costo es tan alto como el de otros materiales que ofrecen más ventajas. Las propiedades deseables son su impermeabilidad y carencia de constituyentes de fácil solución.

En algunos casos es necesario emplear forros para madera, para soluciones casi neutras como es el caso de los baños de níquel, se pueden usar tanques de madera sin forros, que ofrece la ventaja de mantener las duelas húmedas e hinchadas, manteniéndolas bien unidas. Los tanques de madera no son apropiados para soluciones alcalinas fuertes, aun cuando estén forrados. Para baños ácidos débiles, el interior del tanque de madera puede ser pintado con barnices que contengan plásticos sintéticos, para soluciones ácidas, frecuentemente, los tanques se forran de plomo, pero este deberá ser bastante grueso aproximadamente 2,5 milímetros de espesor.

- Hierro y acero: para soluciones alcalinas se usan casi exclusivamente tanques de hierro o acero, de medida gruesa para evitar que se deformen o se corroan en el exterior. Estos tanques poseen la desventaja de ser conductores, teniendo la tendencia a causar cortos circuitos. Sin embargo, esta conductividad es frecuentemente utilizada en la limpieza electrolítica, haciendo que el tanque sirva como ánodo. Cuando se trata de baños ácidos y neutros los tanques se forran de hule, además, sus propiedades aislantes evitan cortos circuitos en el tanque. Al seleccionar un forro de hule se debe tener cuidado de que los materiales que se usaron para vulcanizarlo aparezcan en cantidad menor, como para evitar contaminar la solución. Otra opción es recubrir interiormente el tanque con fibra de vidrio, ya que esta es impermeable, resiste al ataque químico y no contamina la solución.
- Barro cocido: es muy resistente a los ácidos diluidos, comúnmente es vidriado, sin embargo, es atacado por el ácido fluorhídrico, por ejemplo, en soluciones de plomo y algunas veces de níquel. Sin embargo, para evitar estos problemas se puede recurrir a un forro, los más utilizados

son de asfalto, que son muy apropiados para el cromado. Pero no es apropiado para contener soluciones limpiadoras. Una de sus principales ventajas es su baja conductividad eléctrica y su elevada conductividad térmica, lo cual es una ventaja para conservar soluciones frescas. Su principal desventaja es la fragilidad.

- Concreto: los tanques de concreto son fáciles de obtener en cualquier tamaño y forma; sin embargo, no son transportables y tendrán que ser destruidos, si fuera necesario cambiar de ubicación. El concreto no es muy resistente a los ácidos, por lo que requiere de un forro, por ejemplo, el asfalto. También son muy frágiles.
- Vidrio: se usa para la fabricación de tanques muy pequeños, hasta de 4 litros. Son relativamente baratos y prácticamente inafectables por ácidos, además de que permiten la observación de la posición y condiciones de los electrodos. Si se desean temperaturas altas se deben calentar gradualmente, aunque en algunas ocasiones, están mal templados y pueden fallar inesperadamente, por lo que generalmente no se usa en tanques grandes.
- Hule: este material es bastante resistente a las soluciones ácidas, pero no a las soluciones alcalinas, además se suaviza a altas temperaturas y, por lo tanto, no se puede usar con seguridad a temperaturas superiores a 40 grados centígrados.
- Hierro esmaltado: tiene prácticamente la misma resistencia a los ácidos, al igual que el vidrio, pero tiene la desventaja de que después de un largo periodo de tiempo tiende a astillarse. Estos tanques se usan para el dorado y platinado electrolíticos.

- Plásticos: son sustancias químicas sintéticas denominadas polímeros, de estructura macromolecular que puede ser moldeada mediante calor o presión y cuyo componente principal es el carbono. Estos polímeros son grandes agrupaciones de monómeros unidos mediante un proceso químico llamado polimerización. Entre las propiedades y características de la mayoría de los plásticos se pueden mencionar la facilidad de trabajar y moldear además de poseer un bajo costo de producción y baja densidad, suelen ser impermeables, buenos aislantes eléctricos y térmicos, aunque la mayoría no resisten temperaturas muy elevadas, resistentes a la corrosión y a muchos factores químicos y aceptables aislantes acústicos.

3. DISEÑO Y ENSAMBLE DEL EQUIPO PARA ELECTRODEPÓSITOS DE COBRE

3.1. Módulo de electrodeposición metálica

En el presente caso, el módulo de electrodeposición metálica es un dispositivo fijo o móvil que es capaz de mantener el flujo de corriente continua con la finalidad de depositar una fina capa de cobre sobre una probeta de acero para mejorar o cambiar su superficie, utilizando como medio de conducción una solución llamada electrolito (figura 18. a), especialmente diseñado para contener el metal de recubrimiento deseado (cobre), disuelto en forma de partículas microscópicas (iones con carga positiva) en suspensión. Para obtener dicha corriente se puede hacer uso de diferentes fuentes de alimentación, entre las cuales están los generadores, rectificadores, baterías y fuentes de voltajes. Con base en lo anteriormente descrito, se empleó en la construcción del módulo una fuente de voltaje de variable.

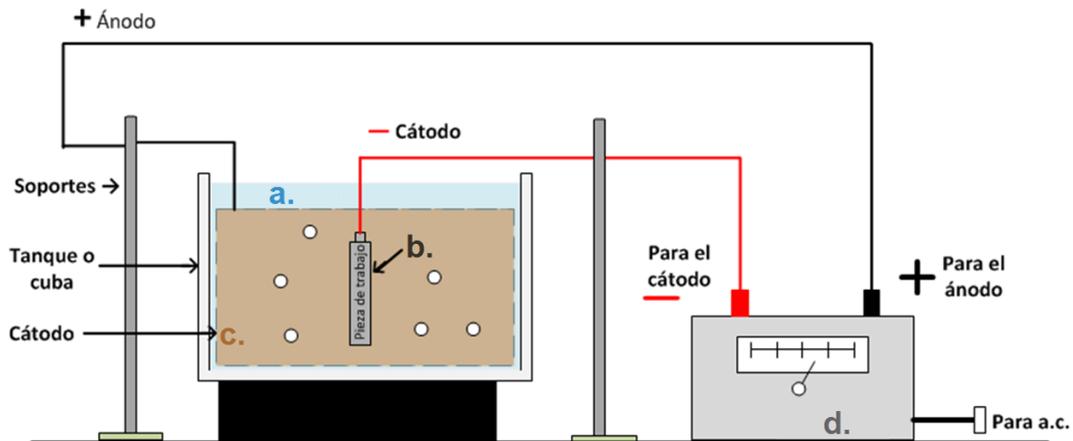
3.1.1. Principios de funcionamiento

En la realización de esta investigación, se diseñaron probetas de ensayo consistentes en ejes de acero SAE 1045 que se sumergen una a una en el electrolito, posteriormente se aplica al sistema una corriente continua de baja tensión. La probeta se encuentra ubicada en el centro del baño de electrolítico, el acero opera con carga negativa, constituyendo el cátodo (figura 18. b). El cobre cargado positivamente funciona como ánodo (figura 18. c), colocado cuidadosamente cerca de los bordes del tanque de revestimiento, juntos completan el circuito de corriente continua. Una fuente de energía conocida

como rectificador (figura 18. d), se utiliza para convertir la energía de corriente alterna a una corriente continua de bajo voltaje cuidadosamente regulado.

Los cables y los caimanes trabajan como un puente conductor de electrones desde el rectificador hasta el cátodo (acero SAE 1045), estos viajan a través del electrolito para el ánodo (placa de cobre) y de vuelta al rectificador. Dado que la corriente eléctrica fluye de positivo a negativo, los iones cargados positivamente del ánodo se desplazan por medio del electrolito hacia el cátodo cargado negativamente. Este movimiento hace que los iones de metal presentes en el baño migren hacia los electrones libres situados en la capa exterior de la superficie del cátodo. Por medio de la electrólisis, los iones metálicos son extraídos de la solución y se depositan como una capa delgada sobre la superficie del acero.

Figura 18. Principio de funcionamiento



Fuente: elaboración propia.

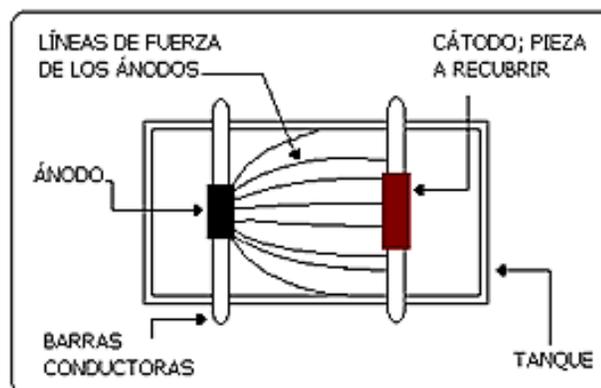
3.1.2. Recubrimiento de piezas

Los recubrimientos se aplican mediante capas finas, cuya función es separar el ambiente corrosivo del metal, es decir que puedan servir como ánodos sacrificables que puedan ser corroídos en lugar del metal subyacente. Estos se pueden realizar de manera total o parcial independientemente de la forma geométrica y superficie de la pieza.

3.1.2.1. Recubrimiento parcial de una pieza

El recubrimiento más sencillo consiste en recubrir solo una de las caras de la pieza o cuando esta tiene una forma regular, esto es, sin cambios drásticos en la superficie, regularmente plana. Esta configuración, también es usada para trabajar piezas muy pequeñas.

Figura 19. Configuración de un cátodo y un ánodo para trabajos sencillos

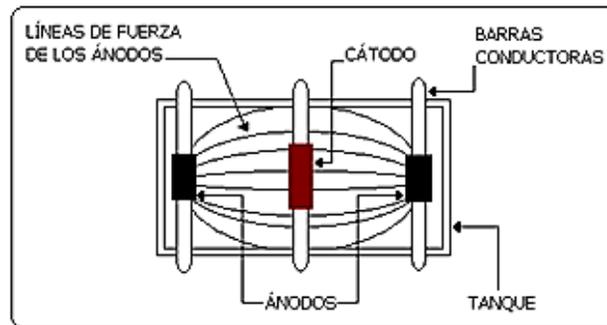


Fuente: DEL CASTILLO RODRÍGUEZ, Felipe. Principios de electrodeposición. p. 17.

3.1.2.2. Recubrimiento total de una pieza

Para recubrir totalmente una pieza, es necesario contar con más de un ánodo, lo que permite un recubrimiento homogéneo, evitando así, que la pieza de trabajo sea sometida a una segunda sesión. Generalmente se emplean dos ánodos equidistantes a la pieza a tratar.

Figura 20. Configuración de dos ánodos equidistantes

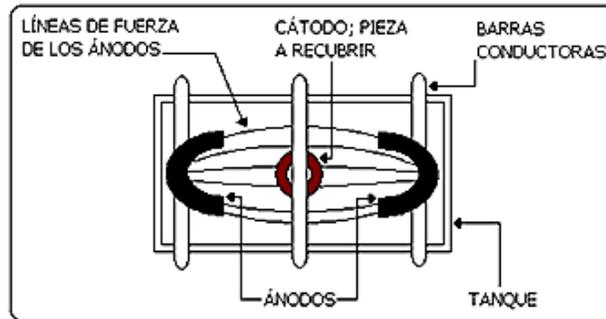


Fuente: DEL CASTILLO RODRÍGUEZ, Felipe. Principios de electrodeposición. p. 18.

3.1.2.3. Recubrimiento de piezas irregulares

En el caso de piezas cuya superficie no sea plana o con cambios drásticos de forma en la superficie, es necesario que los ánodos tengan una forma cercana a la del objeto a recubrir, el caso más común es el recubrimiento de una pieza (cátodo) redonda, con un área pequeña.

Figura 21. **Configuración de dos ánodos para piezas redondas o con forma irregular**

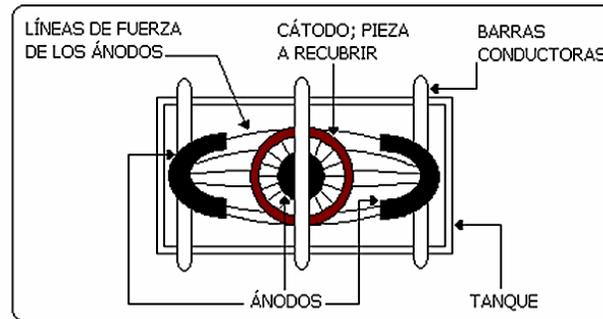


Fuente: DEL CASTILLO RODRÍGUEZ, Felipe. Principios de electrodeposición. p. 18.

3.1.2.4. Recubrimiento exterior e interior

En el recubrimiento de una pieza (cátodo) redonda con área grande o con una forma irregular, se emplean más de dos ánodos. La configuración de estos depende del tamaño de la pieza y de la forma de esta, por ejemplo: si se desea recubrir un tubo es necesario colocar un ánodo dentro del mismo, para que el interior, además de recubrirse, presente también un buen acabado.

Figura 22. **Configuración de los ánodos para recubrir una pieza tubular, interior y exteriormente**



Fuente: DEL CASTILLO RODRÍGUEZ, Felipe. Principios de electrodeposición. p. 18.

3.1.3. **Diseño y ensamble del módulo de electrodeposición metálica**

Con fines didácticos se diseñó y construyó un módulo para realizar electrodeposiciones metálicas, a manera que sus efectos sean repetitivos dentro de un rango de parámetros establecidos con la finalidad de aplicar la metodología científica en los ensayos experimentales.

3.2. **Tanque de baño**

Los tanques para recubrimientos, por lo general poseen forma prismática cuadrangular debido a la facilidad de ser construido y presentar un volumen constante en su interior, lo que permite la uniformidad de la concentración en cualquier punto del tanque. En función de lo anterior se seleccionaron las dimensiones y materiales, en relación al mejor aprovechamiento de los recursos energéticos, la menor contaminación ambiental y de acuerdo a los materiales

disponibles en el mercado, por estas razones se optó por la utilización de plástico.

Figura 23. **Tanque de baño o cuba para de plástico**

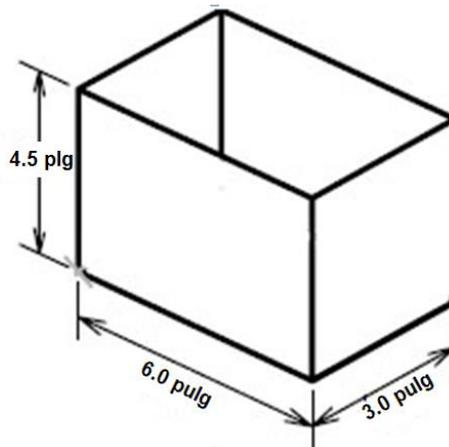


Fuente: elaboración propia.

3.2.1. Dimensiones

Los tanques se diseñan tan grandes y tan hondos como se requiera, éste factor está en función de la(s) pieza(s) a recubrir. A nivel industrial, la capacidad de los tanques varía desde un litro, en el caso de la joyería, hasta tanques de proporciones impresionantes, según la aplicación. Por lo anterior las dimensiones seleccionadas se ilustran a continuación.

Figura 24. **Dimensiones del tanque**



Fuente: elaboración propia.

3.3. Elección y posición del cátodo

Se optó por acero de medio carbono, por satisfacer la condición de diferencia de potencial eléctrico, además de ser económico y ofrecer la facilidad de poder ser recubierto directamente, sin la necesidad de un baño previo de otro metal.

3.3.1. Criterio de selección

Con base en los electrodeósitos más comunes, así como sus respectivos metales base, cabe mencionar que para que un metal sea protegido por otro, deben formar ambos metales un par galvánico, de tal forma que la diferencia de potencial entre los dos materiales sea lo más débil posible. Se eligió el acero de SAE 1045 de medio carbono, por satisfacer la condición anterior, con relación al cobre, además de ser económico y de ofrecer la facilidad de poder ser recubierto directamente, sin la necesidad de un baño previo de otro metal.

Figura 25. **Probetas de acero SAE 1045**



Fuente: elaboración propia. Con el servicio de los Laboratorios de Ingeniería Mecánica, T-7.
Facultad de Ingeniería, USAC.

3.3.2. Propiedades

El acero AISI 1045 es un acero de construcción de medio carbono utilizado ampliamente en elementos de máquinas que requieran mediana resistencia mecánica y tenacidad a bajo costo, responde fácilmente al tratamiento térmico de endurecimiento mediante temple, especialmente en medios severos como el agua, posee buena maquinabilidad y es comúnmente utilizado en piezas endurecidas superficialmente por inducción o llama oxiacetilénica. Entre sus aplicaciones se pueden mencionar ejes, engranajes, cigüeñales, pernos, abrazaderas, cadenas, piezas agrícolas, etc.

Tabla IV. **Propiedades mecánicas y físicas del acero 1045**

Dureza	163 HB (84 HRb)
Esfuerzo de fluencia	310 MPa (45000 PSI)
Esfuerzo máximo	565 MPa (81900 PSI)
Elongación	16% (en 50 mm)
Reducción de área	40%
Módulo de elasticidad	200 GPa (29000 KSI)
Maquinabilidad	57% (AISI 1212 = 100%)
Densidad	7.87 g/cm ³ (0.284 lb/in ³)

Fuente: SUMINDU, S.A. <http://www.sumindu.com/especificaciones/18-%201045.pdf>. Consulta:
5 de agosto de 2013.

Tabla V. **Rangos de composición química**

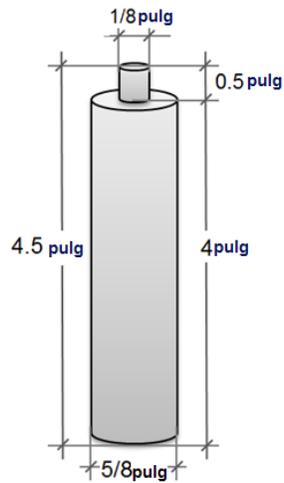
Carbono	Azufre	fósforo	silicio	Manganeso
C	S	P	Si	Mn
0,43 – 0,5	0,04 (Max)	0,04 (Max)	0,15 – 0,35	0,60 – 0,90
Cromo	Níquel	Molibdeno	Vanadio	Tungsteno
Cr	Ni	Mo	V	W
_____	_____	_____	_____	_____

Fuente: SUMINDU, S.A. <http://www.sumindu.com/especificaciones/18-%201045.pdf>. Consulta:
5 de agosto de 2013.

3.3.3. Dimensiones

Respecto a las dimensiones del cátodo se seleccionó un eje de acero SAE1045 de 5/8 de pulgada de diámetro por 4,5 pulgadas de largo; estas dimensiones son de gran importancia, ya que con base al tamaño del cátodo se determinó el volumen mínimo que debe contener el tanque en su interior, el volumen de solución a preparar y el tamaño y forma del ánodo a utilizar.

Figura 26. **Dimensiones del cátodo**

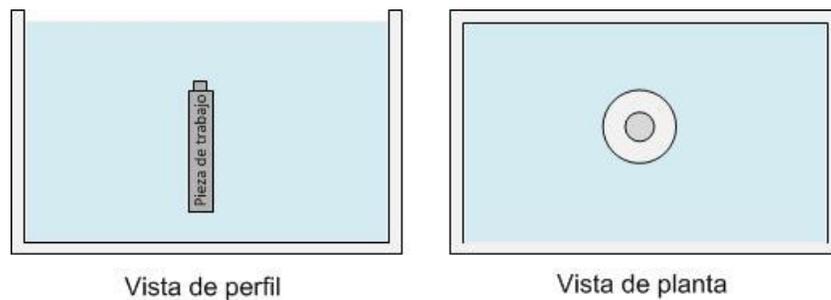


Fuente: elaboración propia.

3.3.4. Posición

El cátodo va situado en el centro del tanque para mantenerlo equidistante al ánodo y de esta manera obtener un recubrimiento uniforme sobre la superficie de la pieza.

Figura 27. **Posición del cátodo en el módulo de electrodeposición**



Fuente: elaboración propia.

3.4. Elección y posición del ánodo

El ánodo es el electrodo compuesto del metal recubridor, en este caso, cobre por ser un material económico de aplicar, resistente y formar una buena base adhesiva para otros metales. Las líneas de fuerza de los ánodos se comportan de la misma forma que las líneas de un campo magnético; es decir, éstas se desplazan de ánodo al cátodo, algunas en línea recta y otras se curvan ligeramente. La posición y la cantidad de los ánodos dependen de la forma del objeto a recubrir, por lo anterior, se debe seleccionar que la forma geométrica del ánodo que garantice una distancia equidistante sobre todos los puntos de la superficie del cátodo.

3.4.1. Criterio de selección

El cobre tiene la particularidad de cubrirse de una capa de óxido que penetra en el metal solo unas cuantas micras, esta capa sirve de protección indefinida, asegurando así una larga vida útil para las piezas a recubrir [<http://www.cobreybronce.com/2009/materialC.htm>]. Por ser uno de los mejores conductores de electricidad y tomando en cuenta el tipo de recubrimiento metálico a realizar (cobreado) se ha seleccionado al cobre como ánodo soluble, es decir, que el material del ánodo (cobre) se disolverá después de la oxidación anódica en el proceso electroquímico. El cobre por ser maleable se presenta comercialmente en forma de alambre, láminas, barras o perfiles. Debido a factores económicos y de disponibilidad en el mercado, se ha optado por utilizar cobre al 99 por ciento de pureza en forma laminada.

Figura 28. **Cobre laminado, 99,9 por ciento de pureza**



Fuente: elaboración propia, con el servicio de Radiadores La Torre.

La distribución de la densidad de corriente puede ser muy diferente de unas zonas a otras de la pieza colocada en el baño, y con ello producirse una capa de grosor diferente (e incluso defectuoso) en cada una, si no se tienen en cuenta ciertos factores geométricos que garanticen la igualdad de la densidad de corriente en todas la áreas de la pieza. Entre esos factores geométricos son:

- Similitud entre el relieve de la pieza y forma de los ánodos
- Posición de los ánodos con respecto a la pieza
- Distancia entre los ánodos y la pieza
- Profundidad de inmersión de la pieza en el baño
- Modo en que se posiciona la pieza dentro del baño

3.4.2. Propiedades

El cobre posee varias propiedades físicas que propician su uso industrial en múltiples aplicaciones, siendo el tercer metal, después del hierro y del aluminio, más consumido en el mundo. Es de color rojizo y de brillo metálico y, después de la plata, es el elemento con mayor conductividad eléctrica y térmica. Es un material abundante en la naturaleza; tiene un precio accesible y

se recicla de forma indefinida; forma aleaciones para mejorar las prestaciones mecánicas y es resistente a la corrosión y oxidación.

El cobre posee una combinación de propiedades naturales que le dotan de una alta resistencia. Al ser un material resistente y noble, es lógico que el cobre asegure una prolongada vida útil a las instalaciones, incluso las sometidas a las más duras condiciones se conservan en excelente estado y óptimo rendimiento durante décadas, sin apenas necesidad de mantenimiento.

El cobre no pierde sus cualidades con el paso del tiempo, la que se traduce en dos beneficios directos: rentabilidad y largos años de tranquilidad.

Tabla VI. **Propiedades físicas y atómicas del cobre**

Símbolo	Cu
Masa atómica	63,536 u
Color	Rojizo brillante
Estado ordinario	Sólido (diamagnético)
Densidad	89602 kg/m ³
Punto de fusión	1357,77 K (1084,62 °C)
Punto de ebullición	3200 K (2927 °C)
Entalpía de vaporización	3004 kJ/mol
Entalpía de fusión	13,14 kJ/mol
Calor específico	385 J/(K·kg)
Conductividad eléctrica	58,108 × 10 ⁶ S/m
Conductividad térmica	400 W/(K·m)
Módulo de Young	130 GPa
Módulo de rigidez	48 GPa
Mineral dureza :	3,0 (sin unidades)
Dureza Brinell	874 MN/m ²

Fuente: WINTER, Mark. <http://www.webelements.com/copper/physics.html>. Consulta: 05 de agosto de 2013.

3.4.3. Dimensiones y diseño

Considerando los factores geométricos descritos anteriormente y la influencia de la disposición de los ánodos sobre la distribución de la capa de recubrimiento para una pieza cilíndrica (cátodo) se ha creado un ánodo prismático recto sin bases de cuatro caras laterales, el cual es una especie de forro que va dentro de la cuba electrolítica.

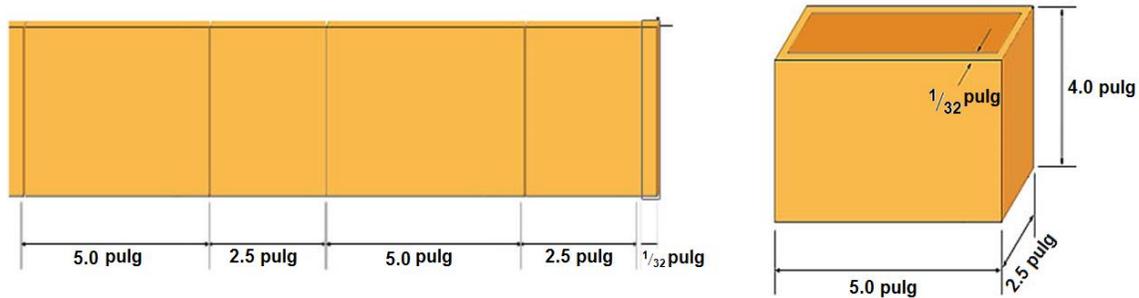
Figura 29. **Diseño del ánodo**



Fuente: elaboración propia, con el servicio de Radiadores La Torre.

Para esto se ha cortado una lámina de cobre de 15 pulgadas de largo y 4 pulgadas de ancho, posteriormente se han realizado en la dobladora, dobleces principales uno a 5, 7,5, y 15,2 pulgadas, y en los extremos se han realizado dobleces secundarios de 1/8 de pulgada que permitirán cerrar el prisma.

Figura 30. Dimensiones del ánodo



Fuente: elaboración propia

3.5. Sistema de sujeción

Para sujetar y mantener las piezas sumergidas en el electrolito existen diferentes opciones, tales como: ganchos, canastos, etc. Estos elementos están en función del tamaño de las piezas a recubrir y del número de estas. Los ganchos se fabrican de distintos metales y se recubren con una pintura aislante y resistente a los productos químicos empleados. Debido a que las piezas a recubrir fueron de dimensiones pequeñas, se optó por la utilización de caimanes como los utilizados en laboratorios de electrónica.

Figura 31. Lagartos de electricidad



Fuente: yotafo.blogspot.com. Consulta: 18 de agosto de 2013.

3.6. Fuente de corriente

En un proceso de depósito electrolítico, es imprescindible una fuente de corriente directa de bajo voltaje. En el caso del cobrizado, considerando la composición del tanque y de las piezas a recubrir el rango de voltaje utilizado oscila entre 1 V y 2 V, cuya potencia depende de la temperatura de trabajo, el tipo de ánodos utilizados, el tamaño del cátodo, es decir, de la(s) pieza(s) a recubrir, así como de la distancia entre ánodos y cátodos. Existen diferentes opciones para alimentar el sistema de electrodeposición. Cada una de estas ofrece ventajas y desventajas, dependiendo de factores como: tamaño del tanque, dimensión de la pieza a recubrir, tipo de electrodeposito, entre otros, por lo que se mencionan los usos más comunes de estas opciones a continuación:

- Generadores: se emplean cuando se tiene que distribuir corriente a grandes distancias.
- Rectificadores: son necesarios debido a que la energía eléctrica se distribuye a las plantas en forma de corriente alterna a 110 voltios o 220 voltios y para poder usarla en galvanoplastia es necesario rectificarla, cambiándola a corriente directa y usar un transformador reductor para reducir el voltaje.
- Acumuladores: debido al alto costo que representa la instalación de generadores o rectificadores, el uso de baterías acumuladoras resulta muy práctico para experimentos en pequeña escala y electrodeposiciones ocasionales, ya que pueden proveer alto amperaje por periodos no muy prolongados.

- Fuentes de voltaje: sustituyen a los acumuladores, sobre todo para tanques pequeños y electrodeposición ocasional, aunque presenta la gran desventaja, al igual que en las acumuladores la dificultad de regular la intensidad de corriente, que es de suma importancia en este proceso.

Con base en las características mencionadas de cada una de las fuentes de alimentación disponibles, se ha optado por una fuente de voltaje, por ser la opción más económica.

Figura 32. **Fuente de voltaje variable análoga**



Fuente: BRIELCO, Componentes electrónicos. Consulta: 18 de agosto de 2013

3.7. **Electrolito**

Un electrolito o electrólito es cualquier sustancia que contiene iones libres, los que se comportan como un medio conductor eléctrico. Debido a que generalmente consisten en iones en solución, los electrólitos también son conocidos como soluciones iónicas.

3.7.1. Reactivos

Durante la disolución de las sales, álcalis y ácidos en el agua, sus moléculas se disocian en átomos o grupos de átomos cargados eléctricamente llamados iones. Estos iones pueden tener carga eléctrica positiva (cationes) o negativa (aniones). La disolución resultante conduce la electricidad, por consiguiente, el electrolito es una solución con base en el material que se desea electro depositar, en este caso cobre. En este estudio se utilizó una solución de sulfato de cobre pentahidratado y ácido sulfúrico con la finalidad de estabilizar el pH de la solución.

3.7.1.1. Agua destilada

Es aquella que como todo tipo de agua está compuesta por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, cuya molécula se representa químicamente por la fórmula H_2O y que mediante el proceso de destilación se le han eliminado las impurezas e iones. La destilación es un método de separación, que se utiliza en la producción de agua destilada (pura) donde básicamente se separan los componentes líquidos de una mezcla. Por lo tanto, el agua destilada es H_2O sin compuestos añadidos.

El proceso consiste en hacer hervir cierta cantidad de agua en un recipiente herméticamente cerrado y conectado a un condensador por su parte superior, el vapor de agua sube y al pasar por el condensador nuevamente se convierte en líquido, agua destilada, que será almacenada en un recipiente colector que estará conectado al otro extremo del condensador.

- Usos más frecuentes del agua destilada

- Consumo humano
 - Como reactivo químico
 - En la industria
 - En medicina
- Ventajas con respecto a otras aguas
 - Su consumo alarga la vida celular y por lo tanto la vida humana
 - Carece de cloro y otros elementos nocivos

Figura 33. **Agua destilada**



Fuente: Laboratorio de Físicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, USAC.

3.7.1.2. Sulfato de cobre pentahidratado

Es un compuesto químico derivado del cobre que forma cristales azules, solubles en agua y metanol y ligeramente solubles en alcohol y glicerina. Su

forma anhidrica (CuSO_4) es un polvo verde o gris-blanco pálido, mientras que la forma hidratada ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) es azul brillante.

Figura 34. **Sal de sulfato de cobre pentahidratado**



Fuente: Laboratorio de Físicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, USAC.

Tabla VII. **Propiedades físicas y químicas del sulfato de cobre pentahidratado**

Nombre comercial	Sulfato de cobre pentahidratado
Fórmula química	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Peso molecular	249.68 g/mol
Estado físico a 25 °C	Sólido
Color	Cristales triclinicos azules transparentes, gránulos cristalinos o polvo
Olor	Inodoro
Punto de fusión [°C]	110 °C (230 °F) pierde $4\text{H}_2\text{O}$ a esta temperatura.
Punto de ebullición [°C]	> 150 °C (> 302 °F) se descompone con la pérdida de $5\text{H}_2\text{O}$
pH	3.5 - 4.5 (solución 5%)
Solubilidad en agua	20,3 g/100 ml de agua (20 °C)

Fuente: [http://es.wikipedia.org/wiki/Sulfato_de_cobre_\(II\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Sulfato_de_cobre_(II)). Consulta: 05 de agosto de 2013.

- Usos

Tiene numerosas aplicaciones: como alguicida en el tratamiento de aguas, fabricación de concentrados alimenticios para animales, abonos, pesticidas, industria del cuero, pigmentos, baterías eléctricas, recubrimiento galvanizados (recubrimientos de cobre ácido por electrodeposición), sales de cobre, medicina, procesos de grabado y litografía, industria del petróleo y acero, entre otras.

3.7.1.3. Ácido sulfúrico

El ácido sulfúrico es un compuesto químico extremadamente corrosivo cuya fórmula es H_2SO_4 . Es el compuesto químico que más se produce en el mundo, por eso se utiliza como uno de los tantos medidores de la capacidad industrial de los países. Una gran parte se emplea en la obtención de fertilizantes. También se usa para la síntesis de otros ácidos y sulfatos y en la industria petroquímica. El ácido sulfúrico se encuentra disponible comercialmente en un gran número de concentraciones y grados de pureza.

Figura 35. **Ácido sulfúrico**



Fuente: Laboratorio de Físicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, USAC.

Tabla VIII. **Propiedades físicas y químicas del ácido sulfúrico**

Nombre comercial	Ácido sulfúrico
Fórmula química	H ₂ SO ₄
Otros nombres	Aceite de vitriolo Licor de vitriolo Espíritu de vitriolo
Peso molecular	98,08 g/mol
Estado físico a 25°C	Líquido aceitoso
Densidad	1800 kg/m ³ ; 1.8 g/cm ³
Color	Incoloro o café
Olor	Inodoro, pero concentrado es sofocante e higroscópico
Punto de fusión	10 °C - 283 K
Punto de ebullición	337 °C - 610 K
Acides [pH]	-3; 1.99 pKa
Solubilidad en agua	Miscible
Valores en el SI y en condiciones estándar (25 °C y 1 atm), salvo que se indique lo contrario.	

Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81cido_sulf%C3%BArico. Consulta: 05 de agosto de 2013.

- **Aplicaciones**

La industria que más utiliza el ácido sulfúrico es la de los fertilizantes. El nitrosulfato amónico es un abono nitrogenado simple obtenido químicamente de la reacción del ácido nítrico y sulfúrico con amoníaco. Otras aplicaciones importantes se encuentran en la refinación del petróleo, producción de pigmentos, tratamiento del acero, extracción de metales no ferrosos, manufactura de explosivos, detergentes, plásticos y fibras.

3.7.2. Preparación de soluciones

Para la preparación del electrolito es necesario saber con claridad la cantidad de soluto en la solución. A continuación se describe el procedimiento para la preparación de la solución de sulfato de cobre a la que se le llama de aquí en adelante solución madre:

- Primero se debe pesar 35 gramos de sulfato de cobre en un beaker (recipiente de vidrio de forma cilíndrica con boca ancha).
- Una vez hecho lo anterior, verter 500 mililitros de agua.
- 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.
- Aforar la solución al volumen requerido (800mililitros).
- Volver a agitar.

Figura 36. Solución de sulfato de cobre



Fuente: elaboración propia, con el servicio del Laboratorio de Físicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, USAC.

Con la propósito de mantener un pH alcalino se agrega al electrolito una solución de ácido sulfúrico al 4 por ciento para preparar dicha solución esto se realiza el siguiente procedimiento

- Pesar 2,1 gramos de ácido sulfúrico en un beaker
- Verter 50 mililitros de agua desmineralizada
- Agitar para obtener una mezcla homogénea

Figura 37. **Solución de ácido sulfúrico**



Fuente: elaboración propia, con el servicio del Laboratorio de Físicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, USAC.

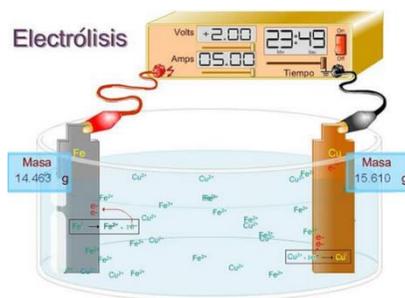
Para manipular cualquier reactivo se debe utilizar equipo de protección personal, como guantes, gafas y bata.

4. ENSAYO DE COBRIZADO

4.1. Descripción

El cobrizado es un acabado que se aplica directamente sobre acero para recubrirlo con una fina capa de cobre por medio de un proceso electrolítico. Se aplica sobre todo tipo de piezas metálicas, para dar apariencia de cobre, y sus terminaciones pueden ser cobre brillante, satinado o envejecido.

Figura 38. Elementos para cobrizar un metal



Fuente: <http://www.seducoahuila.gob.mx>. Consulta: 12 de noviembre de 2013.

4.1.1. Aplicaciones

Es utilizado como recubrimiento en electricidad, parte del sector industrial, decorativo y artístico. También es empleado como etapa intermedia del niquelado, dado sus propiedades conductoras, produce acabados más lustrosos y uniformes; además, un baño previo de cobre incrementa la dureza en el acabado final de níquel. Ayuda a reducir costos, ya que por sus propiedades, el cobre, es un excelente conductor de electricidad y calor; por esta razón cobrizar

el acero reduce el costo en comparación con la fabricación de la misma pieza con cobre puro.

4.2. Procedimiento

Previo a cobrizar el acero, se debe realizar un proceso de mecanizado que consiste refrentar y clindrar el mismo con el fin de obtener una superficie uniforme, así como, reducir el diámetro de uno de sus extremos para facilitar su conexión en el modulo. Posteriormente al mecanizado se prepara mecánica y químicamente la superficie de la pieza.

4.2.1. Preparación de la pieza a recubrir

Se procede a realizar un mecanizado en el torno sobre la pieza. Para esto primero se refrentaron ambas caras de la pieza para evitar desniveles y obtener una superficie prolija con mejor acabado.

Figura 39. **Mecanizado de la pieza a recubrir**



Fuente: elaboración propia, con el servicio de los Laboratorios de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería, USAC.

Seguido, se marcó a 1/2 pulgada de uno de los extremos del eje para iniciar con el proceso de cilindrado, con la finalidad de facilitar el agarre de los lagartos a la pieza, hasta llegar a un diámetro de 1/8 de pulgada.

Figura 40. **Pieza al final del mecanizado**



Fuente: elaboración propia, con el servicio de los Laboratorios de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, USAC.

4.2.2. Preparación de la superficie

Para el proceso de cobrizado electrolítico es de suma importancia la preparación de la superficie de la pieza que se desea tratar. Todas las imperfecciones presentes en la superficie del eje que se desea cobrizar van a formar parte del acabado final y en la mayoría de los casos, no se van a atenuar, sino que al contrario, van a ser exageradamente notorias. En el área superficial donde exista presencia de grasa u óxido, el material no se adherirá bien, el recubrimiento será defectuoso y se desprenderá del acero. A continuación se describe una serie de procedimientos a llevar a cabo para la preparación superficial de piezas, previas al recubrimiento.

- Pulido: el proceso puede incluir varias fases, como el esmerilado, lijado y pulido.

- El esmerilado se usa para quitar rápidamente material sobrante, por lo general se emplea para quitar rebordes que son resultado del proceso de corte de la pieza.
- El lijado y pulido tiene el propósito de borrar la huella dejada por el esmeril y alisar, pulir, abrillantar o limpiar la superficie. El lijado es una tarea fundamental en cualquier trabajo de acabado de recubrimiento metálico. Para estos se hace uso de un juego cuatro lijas, 100, 400, 600 y 1200, en donde el tamaño de grano de la lija es inversamente proporcional al número que la identifica.

Figura 41. **Pieza a recubrir pulida**



Fuente: elaboración propia, con el servicio de los Laboratorios de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, USAC

- **Desengrase**

Después que la superficie quedó con una textura uniforme, se eliminó el residuo de polvo proveniente del lijado, el aceite y la grasa del mecanizado. En este caso se realizó un desengrase con detergente químico. Para esto se preparó una solución que contiene 5 gramos de nonil fenol diluidos en 50 mililitros de agua desmineralizada.

Figura 42. **Desengrase químico**



Fuente: elaboración propia, con el servicio del Laboratorio de Físicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, USAC.

- **Decapado**

En esta etapa se prepara una solución de ácido sulfúrico al 10 por ciento 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 rocía con la solución y se deja en reposo aproximadamente 2 minutos. Posteriormente la pieza es lavada con agua de llave. Después de estos pasos la pieza está lista para el proceso de cobrizado.

Figura 43. **Decapado de piezas**



Fuente: elaboración propia, con el servicio del Laboratorio de Fisicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, USAC.

4.2.3. Preparación del electrolito

Para la preparación del electrolito es necesario saber con claridad la cantidad de soluto en la solución. Ya que al tener una solución muy concentrada se produce un recubrimiento grueso, poroso y de poca adherencia resultando inservible. Por lo anterior se realiza una dilución de solución madre a la que llamaremos electrolito.

- Primero se tomó un vaso de precipitado y se vertieron 235 mililitros de solución madre.
- Una vez hecho lo anterior, se agregaron 500 mililitros de agua desmineralizada.
- Se aforó la solución al volumen requerido (950 mililitros).

- Posteriormente se adicionaron a la solución 50 mililitros al 4 por ciento de ácido sulfúrico
- Se procedió a agitar para obtener homogeneidad en la nueva solución.

Figura 44. **Electrolito final. Disolución de solución madre**



Fuente: elaboración propia, con el servicio del Laboratorio de Físicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, USAC.

4.2.4. Metodología para la obtención del recubrimiento

Se montó el dispositivo mencionado en el capítulo anterior, conectando el lagarto negativo al eje de acero ya tratado (cátodo) y el lagarto con corriente positiva la lámina de cobre (ánodo).

Figura 45. **Montaje del módulo de electrodeposición metálica**



Fuente: elaboración propia, con el servicio del Laboratorio de Físicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, USAC.

Se sumergieron el cobre y el acero en el sulfato de cobre y se encendió la fuente de alimentación utilizando un voltaje de 2 voltios. Los ejes se dejan por un lapso de 3, 9 y 12 minutos respectivamente; posteriormente se retira de la solución. Al retirar la probeta se notará un color rojizo indicador de que el cobre se ha depositado.

Figura 46. **Proceso de cobrizado**



Fuente: elaboración propia, con el servicio del Laboratorio de Físicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, USAC.

Finalmente se procedió a lavar con agua corriente para retirar el exceso de cobre. Y así poder observar el recubrimiento de cobre final. Con el propósito de establecer la efectividad del recubrimiento las superficies son caracterizadas antes y después de la inmersión en la solución CuSO_4 mediante inspección visual. Como una opción después del cobrizado y para mejorar y proteger la apariencia del mismo, se puede pulir la superficie con pasta para pulir y una franela fina, o bien agregar algún tipo de laca para aumentar el brillo.

A continuación, con la finalidad de representar gráficamente el proceso de cobrizado, se presenta una imagen con la secuencia de pasos mencionados con anterioridad

Figura 47. **Secuencia de pasos para realizar un cobrizado**



Fuente: elaboración propia, con el servicio de los Laboratorios de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería y el Laboratorio de Físicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. USAC.

4.3. Resultados

Los experimentos iniciales se realizaron con la solución madre como electrolito de 0,18 molar de sulfato de cobre y un tiempo de exposición de 1 minuto. Los experimentos de recubrimiento dieron lugar a un recubrimiento negro, no el chapado brillante de color cobre que era de esperar. Mediante la alteración de los parámetros de pH, la corriente y el tiempo de recubrimiento, el proceso solo mejoró ligeramente. Se determinó que durante el uso de ácido clorhídrico se tenía la ventaja de minimizar el pH de la solución, lo que permitía obtener un recubrimiento con mejor adherencia a la superficie de la probeta de acero y reducir la oxidación del cobre, responsable de la coloración oscura del depósito.

Figura 48. Depósito de cobre oxidado



Fuente: elaboración propia.

Con el propósito de normalizar el sistema, se preparó una disolución de la solución madre, utilizando 0,04 molar de sulfato de cobre y 0,43 molar de ácido sulfúrico. Con los parámetros optimizados con base en la praxis de la

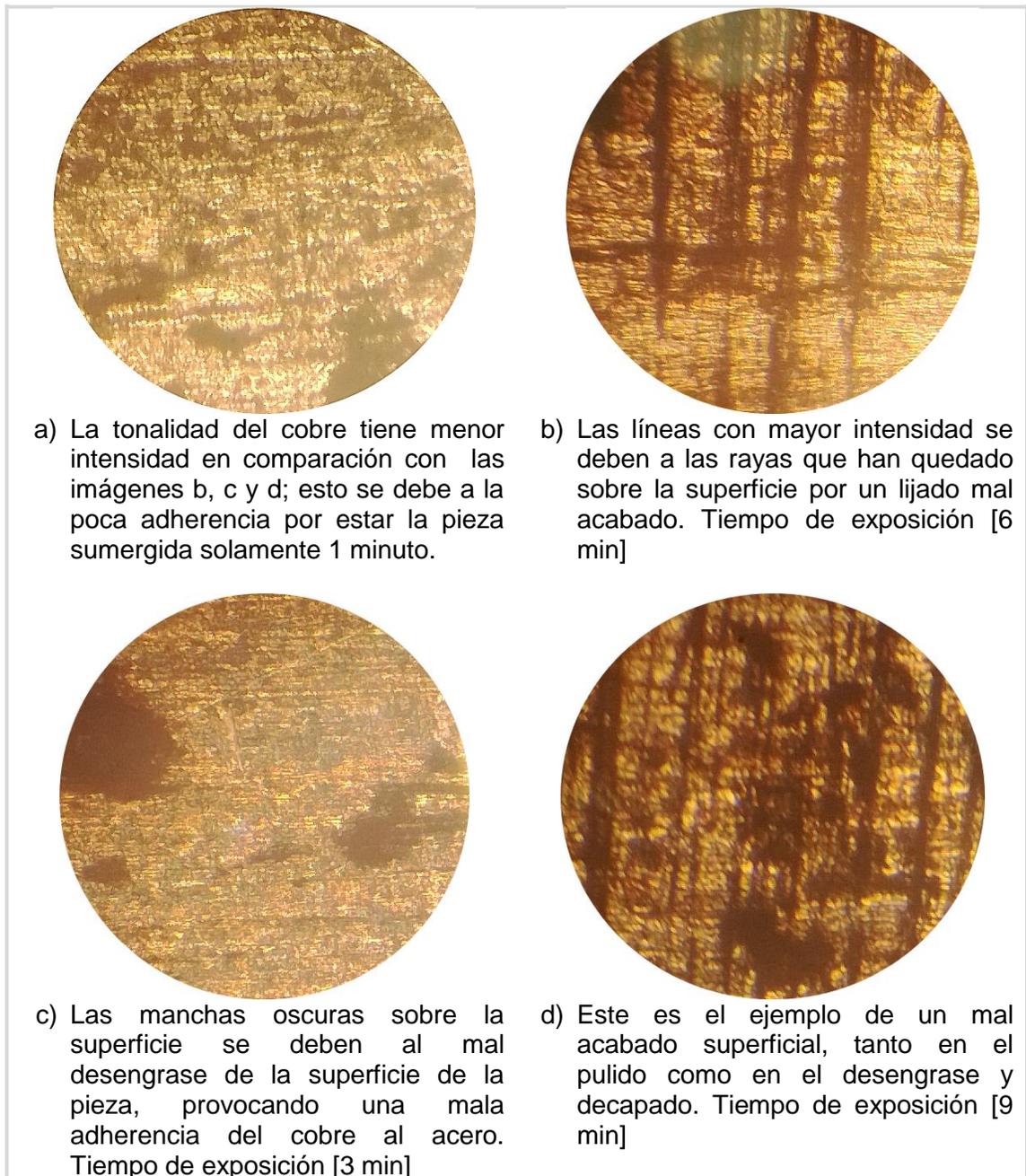
investigación del revestimiento de cobre realizado anteriormente, con un pH de 1,0, una corriente de $2,0 \pm 0,1$ miliamperios y un tiempo de exposición aproximadamente 3 a 6 minutos, se lograron obtener recubrimientos de cobre de mejor calidad de color cobre brillante.

Finalmente, con el objetivo de determinar la calidad de los recubrimientos, se utilizó el microscopio del laboratorio de metalurgia y metalografía de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial de la FIUSAC, se tomaron las imágenes que se muestran a continuación, las cuales corresponden a los defectos presentados en la superficie de las probetas debido a tres variables, los cuales son:

- Tiempo de exposición
- Preparación de la superficie - lijado
- Preparación de la superficie - limpieza o desengrase

Sin embargo, después de haber sido observado en el microscopio, se logró determinar que además de haber logrado optimizar las variables del sistema; el acabado superficial de la pieza era de gran importancia para obtener un acabado uniforme. La figura 49. a. representa recubrimientos mal hechos a diferentes tiempos de trabajo; empezando por la imagen que muestra las deficiencias de un recubrimiento de cobre pobre debido al mal cálculo del tiempo de exposición de la pieza dentro del electrolito, mientras que la figura 49. b. representa un depósito deficiente por una mal lijado de la superficie; la figura 49. c. corresponde a un mal uso o elección del agente desengrasante en la pieza a recubrir y, finalmente, la figura 49. d. muestra la combinación de una incorrecta preparación de la superficie, tanto en lijado como en desengrase.

Figura 49. **Depósitos de cobre defectuosos**

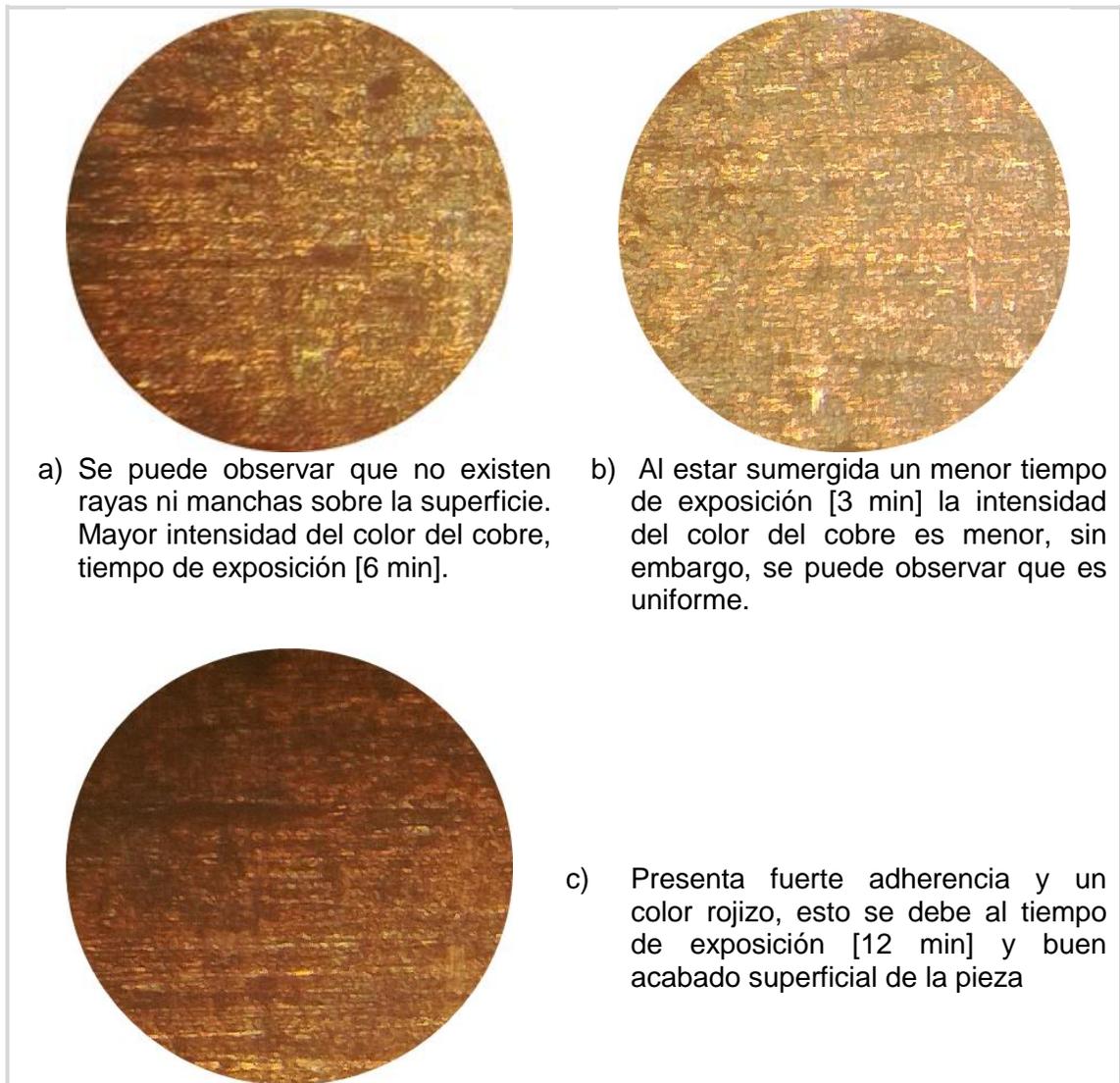


Fuente: elaboración propia, Micrografías a (5)x. con el servicio del Laboratorio de Metalurgia y Metalografía, Facultad de Ingeniería, USAC.

Si bien, todas las micrografías mostradas en la figura 49 son de depósitos de cobre defectuosos, se debe discutir cada una de estas imperfecciones atribuidas a causas diferentes. Tomando como ejemplo la figura 49. b, la cual presenta rayas de color rojizo intenso y comparándola con la figura 49. c que a diferencia de la anterior presenta manchas de color rojizo en lugar de rayas, se puede determinar que ambos defectos se deben a un mal acabado superficial, por un mal lijado y pulido o un desengrase y decapado deficiente de la superficie de la probeta, respectivamente. Pero también puede darse una combinación de ambos defectos en el acabado superficial, dando como resultados depósitos de cobre como el de la figura 49. d.

Como contraparte, a continuación se muestra la figura 50 correspondiente a los mejores depósitos realizados, en función de las tres variables descritas anteriormente. La figura 50. a, corresponde a un buen depósito por tiempo de exposición, mientras que la figura 50 en sus literales b y c corresponden a un buen depósito por un buen acabado superficial; tanto lijado y pulido como limpieza o desengrase.

Figura 50. **Depósitos de cobre de buena calidad**



Fuente: elaboración propia, Micrografías a (5)x. Laboratorio de Metalurgia y Metalografía, Facultad de Ingeniería, USAC

Con base en lo anterior, comparando las micrografías de la figura 50, las cuales tiene un aspecto uniforme y en donde solo existe una variación en la tonalidad del recubrimiento, se puede apreciar que se han dado depósitos de

cobre con una morfología diferente a los de la figura 49, discutidos anteriormente.

En cuanto al aspecto de la superficie en las muestras obtenidas en estos ensayos, se pudo observar a simple vista, que las diferentes tonalidades entre un revestimiento de cobre y otro, tal y como se muestra en la figura 51, se debe a que las probetas poseen un depósito de cobre ligero debido al corto tiempo de exposición, como se puede apreciar en las micrografías de la figura 48 a y d y en las micrografías de la figura 49. b; las cuales muestran una coloración dorada. Por el contrario, al estar las probetas expuestas a un mayor tiempo de exposición dentro del módulo, se deposita en su superficie una mayor cantidad de cobre, dando como resultado una tonalidad de cobre rojizo.

Figura 51. **Probetas ensayadas en el módulo de electrodeposición**



Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. Considerando los principios de funcionamiento, las características de diseño y los diferentes criterios de selección de materiales a utilizar en el ensamble del módulo de electrodeposición metálica descrito en el cuerpo de este trabajo, se obtuvieron recubrimientos de cobre de buena calidad, de color rojizo y con buena adherencia, cumpliéndose así el objetivo principal de este trabajo.
2. El acabado superficial es de vital importancia en este proceso, se observó que el acabado con lijas gruesas no es el óptimo para lograr un depósito de calidad; por el contrario, el acabado superficial logrado después del lijado y el pulido con lija número 1200 es el más adecuado para obtener un depósito de cobre de calidad; esto se debe a que se logra mayor uniformidad de la superficie de la pieza.
3. El comportamiento del depósito realizado con solución madre y con disolución de sulfato de cobre, debido a la concentración, afecta a la variable tiempo y a la calidad final del recubrimiento, ya que se observa que entre mayor sea la concentración de la solución, los tiempos de inmersión se reducen, y mientras sea menor 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, debido a que no hay adherencia. Con base en lo anterior se puede afirmar que el espesor del recubrimiento es directamente proporcional al tiempo de exposición a una misma concentración y, que a mayor

concentración de la solución, menor será el tiempo de exposición de la pieza en el electrolito.

4. Se ha determinado que la concentración ideal del electrolito debe ser de 0,1 molar, mantener a un pH = 1 por medio de la adición de una solución de ácido sulfúrico al 4 por ciento y trabajar con un voltaje de 2 voltios, ya que con estos parámetros se observaron los mejores recubrimientos, los cuales presentaron buena adherencia y lustrosidad.

RECOMENDACIONES

1. Este tipo de recubrimiento no debe aplicarse a 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.
2. Los depósitos de cobre deben realizarse en piezas terminales, como un acabado final; es decir, piezas que no serán sometidas a ningún maquinado posterior: cortes, desbastes; ni mucho menos esfuerzos y deformaciones a la pieza tras haberla tratado, ya que el depósito de cobre se podría desprender del acero.
3. Adicionar abrillantadores al baño electrolítico para observar la diferencia del recubrimiento superficial.
4. Como acabado final al cobreado podría aplicarse algún tipo de laca, con el objetivo de darle una mejor apariencia a la pieza y al mismo tiempo proteger el recubrimiento de cobre, esto se recomienda, más que nada, en piezas ornamentales.
5. Al proyecto de investigaciones metalúrgicas de la Escuela de Ingeniería Mecánica, utilizar el mismo módulo para realizar otro tipo de electrodepositos metálicos, por ejemplo, cromados, niquelados o baños de metales preciosos, con la finalidad de establecer parámetros de forma experimental y contribuir al desarrollo didáctico.

BIBLIOGRAFÍA

1. AGUILAR RIVAS, Roberto Alejandro. *Corrosión y aceros inoxidable*s. Guatemala: SIE INDESA, 2006. 26 p.
2. _____. *Introducción a la metalurgia*. proyecto de investigaciones metalúrgicas. Universidad de San Carlos de Guatemala. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2012. 26 p.
3. ALONZO-VANTE, Nicolás. *Electroquímica y electrocatálisis, materiales: aspectos fundamentales y aplicaciones*. Argentina: e-libro.net, 2013. 429 p.
4. BURNS, Robert Martin. *Recubrimientos protectores de los metales*. Madrid: Edición Interciencias, 1964. 680 p.
5. CUESTA FERNÁNDEZ, Luis. *Análisis del fenómeno de la corrosión en metales de uso técnico: metales. Procedimientos de protección*. Andalucía, España: Asociación por la innovación educativa, Eduinnova, 2009. 94 p.
6. DEL CASTILLO RODRÍGUEZ, Felipe. *Principios de electrodeposición*. Laboratorio de tecnología de los materiales, Departamento de Ingeniería, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Universidad Autónoma de México, 2008. 40 p.

7. DUMEY, L. J., *Electroplating Engineering Handbook*, 4a ed. New York: Van Nostrand Reinhold Co., Inc., 1984. 790 p.
8. GROOVER, Mikell P. *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*. México: Prentice-Hall Hispanoamericana, 1997. 1062 p.
9. JULVE SALVADÓ, Enrique. *Electrodeposición de metales: fundamentos, operaciones e instalaciones*. España, 2000. 397 p.
10. KALPAKJIAN, Serope. *Manufactura, ingeniería y tecnología*. 4a ed. México: Pearson Educación, 2002. 1152 p.
11. ORTEGA MAIQUEZ, José Antonio. *Corrosión industrial*. Marcombo, 1990. 116 p.
12. SMITH, William F. *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. 4a ed. España: McGraw-Hill. 1993. 1210 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. Proceso de manufactura del ánodo



Fuente: elaboración propia, con el servicio de Radiadores La Torre.

Apéndice 2. Preparación de solución de sulfato de cobre



Fuente: elaboración propia, con el servicio del Laboratorio de Físicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, USAC.

Apéndice 3. Preparación de desengrasante



Fuente: elaboración propia, con el servicio del Laboratorio de Físicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, USAC.