

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**EFFECTO DEL ANODIZADO SOBRE LA RAZÓN DE DESGASTE DE  
UNA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061**

PRESENTADO POR:

**JOSÉ MIGUEL RAMÍREZ RODRÍGUEZ  
LINDON WILSON RAMÍREZ YANES**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:  
**INGENIERO MECÁNICO**

CIUDAD UNIVERSITARIA, SEPTIEMBRE DE 2009

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTOR :

**MSc. RUFINO ANTONIO QUEZADA SÁNCHEZ**

SECRETARIO GENERAL :

**LIC. DOUGLAS VLADIMIR ALFARO CHÁVEZ**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

DECANO :

**ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO**

SECRETARIO :

**ING. OSCAR EDUARDO MARROQUÍN HERNÁNDEZ**

**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

DIRECTOR :

**ING. JUAN ANTONIO FLORES DÍAZ**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**INGENIERO MECÁNICO**

Título :

**EFFECTO DEL ANODIZADO SOBRE LA RAZÓN DE DESGASTE DE  
UNA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061**

Presentado por :

**JOSÉ MIGUEL RAMÍREZ RODRÍGUEZ  
LINDON WILSON RAMÍREZ YANES**

Trabajo de Graduación aprobado por :

Docente Director :

**Dr. y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ**

San Salvador, Septiembre de 2009

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Director :

**Dr. y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ**

## AGRADECIMIENTOS

*Extendemos nuestras más sinceras muestras de respeto y agradecimiento al coordinador Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz, por aportar su conocimiento, dedicación y paciencia, para la realización de este trabajo de graduación; a los Ingenieros Francisco De León Torres, Juan Antonio Flores Díaz, Francisco Zuleta, Rigoberto Velásquez Paz y Humberto Guidos por habernos guiado a lo largo de nuestra vida de estudiantes.*

*También a nuestros compañeros y amigos de la Unidad Productiva Metal Mecánica, quienes nos ayudaron de forma desinteresada, en especial a Mauricio Polanco y a Juan Bautista.*

*A Wilber Chavez, por ser como un tercer compañero de tesis.*

*Hubo un día que soñamos ser bachilleres... y lo logramos*

*Hubo un día que soñamos ser Ingenieros Mecánicos... y lo logramos*

*Hoy soñamos con ser grandes profesionales... y lo lograremos.*

**Mike y Wilson**

## **DEDICATORIA**

A mi Señor Jesucristo, Dios Todopoderoso, por haberme regalado la vida y un espíritu terco a pesar de todo.

A mis Padres, Don Gabriel y Niña Flor, por su paciencia, sus consejos y por ser mis guías a lo largo de mi vida.

Mis Hermanas, Gabriela y Sharon, por aguantar mis momentos de disciplina e indisciplina, por prestarme atención a los que les decía aunque estuviera equivocado y esperar el momento correcto para decirme que no era así.

A mi Hermano, Luis Lemus, por las palabras correctas en el momento correcto y con resultados sorprendentes. Mi hermano del alma.

A La Familia, no voy a entrar en pleitos por la posición de los nombres, van por orden alfabético, sólo den gracias a Dios que no se me olvida ni uno. A las niñas; Claudia Eugenia Machuca, Enma Aracely Arriola, Olga Leonor Amador y Sara María Barbón, también a William René Vaquerano, Manuel Emilio Velis, Fernando Rivera, Gino Francisco Caballero, Jaime Roberto Domínguez y Luis Rodolfo Valencia.

A mis Primeros Amigos de la U, Jessica, Wendy, Gilma, Moisés, Gino, Mátal, Jose, Juan Pablo, Kewin, Kelvin, Elí, Alejandro, con quienes se establecieron los fundamentos y después de casi diez años, siguen como el primer día

A mi Compañerito de Tesis, Wilson, que después de Guatemala/06, nos hemos establecido metas y trabajos excelentes, a Polanco, por ese esfuerzo adicional fuera de su obligación por prestar una ayuda más allá y a Wilber Chávez, por ser como un integrante de la tesis con aportaciones valiosas, horarios exhaustivos y una dedicación asombrosa en pro de la causa

A mi Gente, todos aquellos con los que de una u otra manera pasamos un momento de ocio en la U, y de allí, se hizo un gran lazo de amistad. Si los pongo, todo bien, sí se me olvidan, va a haber pleito. Mejor sé consiente si vas o no aquí. Si estuviste en la defensa, son mi gente, si no... bueno...

José Miguel Ramírez

## **DEDICATORIA**

Este sueño conquistado se lo dedico a:

**DIOS TODO PODEROSO:** por haberme dado la vida, perseverancia y sabiduría para culminar un sueño más, en mi vida.

**A MI MADRE MARGARITA RAMÍREZ,** por apoyarme con todo su cariño, comprensión y paciencia, para alcanzar esta meta importante y difícil, por ser el pilar de mi familia, y enseñarme desde el primer día de mi vida a superar obstáculos.

**A MAMA ESPERANZA:** mi abuela, Por su fortaleza, por enseñarme a trabajar duro por alcanzar mis metas.

**A MIS TÍOS Y TÍAS.** Por su apoyo incondicional, a lo largo de mi vida, por soportarme, gracias.

**A MIS HERMANAS LANDERS Y VERO:** Por brindarme palabras de aliento cuando las necesité, y ayudarme en todo para llegar al final de este camino.

**A MI HIJITA LINDA NYKY:** Llegaste justo en el momento en que las fuerzas me faltaban y me dijiste desde tu primer día de vida tu puedes papi, gracias hijita linda. Eres la luz de mi vida.

**A MIS SOBRINOS:** Hen y Diego, por su alegría y locuras de cada día.

**A EVELIN GARCÍA:** por estar ahí cuando lo necesite, por toda tu comprensión y cariño, por creer en mis locuras y compartirlas, y mostrarme que se puede salir adelante con esfuerzo y sacrificio te admiro mucho a tí y a tu hermana.

**A MIS AMIGOS DE TODA LA VIDA,** si se me olvida alguno mil disculpas:

Al Ing. Edwin González Chicas: Por tantas cosas que me ayudaste a superar.

A mis amigos con toda gratitud y respeto por sus consejos que he puesto en práctica a lo largo de mi vida: A los Ingenieros Efraín García Arias, Roberto Carlos Villatoro, Juan Carlos Artiga, Mauricio Polanco, Elvis Enríquez, Elmer Perla, Andrés Merino así como también a Guillermo Guevara, Mario Flores, Oscar Velásquez, Margarita Aguirre, Lic. Cristy Alemán, en general a todas las personas que de una u otra forma han influido en mi forma de ser y en lo que creo.

A MIS COMPAÑEROS DE LA ASEIM: Vega, Susana, Kelvin, Tinetti, Mauricio Meléndez, Pedro Chávez, Miles, Ing. Isaac, Ing. Pedro Pino, Many, Lima Jaco, Misael, Valeriano, Nelson Méndez, Mozo, Reynaldo, Ricardo Pérez, Manolo, Mario Milla, Carlos Juárez, Raúl Romero, Marcos, Ana Frank, Wil Shutin, en general a todos los compañeros de la ASEIM, con los cuales compartimos ideas, conocimientos y diversos momentos, a la Niña Teresita y a Leonor Fernández por apoyarme en todos mis proyectos.

A TODOS LOS COMPAÑEROS DE LOS REFUERZO ACADÉMICOS, que conocí a lo largo de este tiempo, que me ensañaron a ver la vida diferente, cada grupo fue especial y debido a se me han olvidado algunos nombres, no los pondré nombre; pero sí participaron en los refuerzos académicos siéntanse parte de este sueño, a todos los compañeros del localito, por tantos momentos de alegría, estudio y lucha que tuvimos en los últimos años, en especial a wilber, a los hermanos Eduardo y Luis Rosa, Ricardo, Raúl, Luis catalino, miguel arquitectura, Miguel Siguenza, Jenny, Cecy, Hebert, a Victor y Paty, Julio, Jose, bayron, Emerson, en general a todos, gracias por compartir parte de su vida conmigo.

A MI COMPAÑERO DE TESIS: por tantas locuras compartidas y el compartir la locura de este trabajo no podía faltar gracias.

**WILSON YANES**

	Pag.
ÍNDICE	
RESUMEN.....	xv
INTRODUCCIÓN .....	xvi
CAPÍTULO I	
MARCO TEÓRICO.....	1
1.1 Propiedades del aluminio .....	1
1.1.1 Clasificación de las aleaciones de aluminio. ....	8
1.1.2 Propiedades de las aleaciones de aluminio 6061-T6. ....	16
1.2 Anodizado .....	18
1.2.1 Conceptos de anodizado .....	19
1.2.2 Tipos de anodizado.....	19
1.2.3 Historia del anodizado en El Salvador .....	20
1.2.4 Descripción del proceso de anodizado .....	23
1.3 Normas de control y seguridad ambiental aplicadas al proceso .....	36
1.4 Aplicaciones de las aleaciones de aluminios 6061 anodizadas.....	44
1.5 Conceptos de desgaste y fricción .....	45
CAPÍTULO II	
2. Diseño del sistema para el proceso de anodizado de aluminios .....	52
2.1 Flujograma de la metodología del diseño del sistema.....	52
2.2 Selección del aluminio.....	53
2.2 Probetas a anodizar .....	53
2.4 Diseño del sistema electrolítico .....	55
2.4.1 Dimensiones de la cámara de inmersión.....	55

2.4.2	Cálculo del votaje a utilizar y selección del elemento generador y dispositivo de control.....	62
2.5	Reactivos quimicos a utilizar en el sistema.....	64
2.5.1	Reactivos de la solucion acuosa.....	65
2.5.2	Reactivos utilizados en el proceso de anodizado y para la preparacion de probetas.....	69
CAPITULO III		
3.	Contrucción y ensamblaje del sistema .....	72
3.1	Contrucción de la camara del sistema de electrólisis.....	72
CAPITULO IV		
4.	Manuales de trabajo del sistema .....	78
4.1	Normas de seguridad e higiene en el tratamiento de los reactivos a utilizar en el proceso .....	78
4.2	Manuales para la limpieza y pasivacion de las piezas a recubrir con el sistema de anodizado.....	92
4.3	Manual del tratamiento y manejo de desechos químicos del proceso.....	103
CAPITULO V		
5.	Metodología experimental y resultados .....	108
5.1	Flujograma de la metodología.....	109
5.2	Proceso de anodizado .....	110
5.3	Determinación de espesores de los recubrimientos obtenidos en el proceso ...	118
5.4	Determinacion de la razón de desgaste .....	121
5.5	Análisis de resultados .....	125
CONCLUSIONES .....		131
REFERENCIAS.....		132

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.1.1. Esquema de producción de aluminio por el método Bayer. ....	2
Fig. 1.2. Producción de aluminio en una celda electrolítica. ....	3
Fig. 1.3. Propiedades mecánicas en función de la pureza del aluminio.....	8
Fig.1.4. Curvas potencioestáticas de oxidación anódica. ....	24
Fig. 1.5. Proceso de polarización anódica.....	24
Fig. 1.6. Sección esquemática de la capa barrera o anódica .....	26
Fig. 1.7. Correlación entre la densidad de poros y voltajes de operación del anodizado ....	27
Fig. 1.8. Esquema del proceso de anodizado. ....	29
Fig. 1.9. Mecanismo de sellado de la capa anódica. ....	33
Fig. 1.10. Absorción del colorante por la capa anódica.....	34
Fig. 1.11. Clasificación de actividades según la ley de medio ambiente.....	41
Fig. 2.1. Especímenes para el anodizado (a) Esquema (b) Fotografía. ....	52
Fig. 2.2. Cámara de inmersión para anodizar con ácido sulfúrico.....	56
Fig. 2.3. Cable THHN #14. (A) Alambre de cobre recocido, (B) Aislamiento PVC y (C) sobrecapa de nylon como aislante .....	59
Fig. 2.4. Medidor de temperatura digital con haz infrarrojo.....	60
Fig. 2.5. Medidor de temperatura digital con punta de contacto.....	61
Fig. 2.6. Medidor de temperatura análogo de contacto.....	61
Fig. 2.7. Pinza amperimétrica con termocuplas. ....	63
Fig. 2.8. Fuente de potencia y rectificador de corriente.....	64
Fig. 2.9. Esquema molecular del ácido sulfúrico y espaciado molecular. ....	65
Fig. 4.1. Tanque T-1152 debidamente rotulado.....	86
Fig. 4.2. Tanque bajo norma T-1152 para ácido sulfúrico rotulado con porcentaje de concentración. ....	87
Fig. 4.2. Diamante de fuego explicado por la Norma NFPA 704 para materiales peligrosos. División azul; riesgo para la salud. División roja; peligro de inflamabilidad. División amarilla; riesgos por reactividad. División blanca; indicaciones especiales.....	88

Fig. 5.1. Desengrasado de los especímenes, en una solución de 5% de ácido sulfúrico y 95% de agua destilada. ....	111
Fig. 5.2. Eliminación de residuos de ácido sulfúrico, producto del desengrasado de los especímenes. ....	112
Fig. 5.3. Decapado del material, en la imagen se muestra la acción de la soda cáustica sobre la aleación de aluminio .....	113
Fig. 5.4. Deposito para la realización de la electrolisis donde se observa el cátodo, antes del inicio del proceso de anodizado.....	114
Fig. 5.5. Deposito para la realización de la electrolisis donde se observa el cableado para la transmisión de corriente.....	114
Fig. 5.6. Colocación de los especímenes en el depósito para la realización de la electrolisis.....	115
Fig. 5.7. Colocación de los dispositivos de control y energización del proceso.....	115
Fig. 5.8. Procesos de sellado el cual se realiza en agua desmineralizada a 100 °C. ....	117
Fig. 5.9. a y b. Medidor de Defelsko, para mediciones de capa anódica, por medio de corrientes de Eddy, (a) vista superior (b) vista superior. ....	118
Fig. 5.10. Especímenes anodizados, (a) espécimen anodizado y coloreado (b) espécimen sin coloreo. ....	110
Fig. 5.11. Controles de Máquina de desgaste tipo espiga sobre disco. ....	121
Fig. 5.12. Ensayos en la Máquina de desgaste tipo espiga sobre disco. ....	121
Fig. 5.13. Huellas producidas por el desgaste de la espiga sobre la probeta. ....	126
Fig. 5.14. Grafica de Espesor de capa anódica vs Tiempo de inmersión.....	127
Fig. 5.15. Grafica de Espesor de capa anódica vs Razón de desgaste. ....	128
Fig. 5.16. Grafica de Razón de desgaste vs Tiempo de inmersión. ....	129

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Propiedades y costo de aleaciones no ferrosas más utilizadas.....	3
Tabla 1.2 Efectos de los maquinados de endurecimiento en el aluminio y sus aleaciones....	4
Tabla 1.3 Resumen de las características físicas del aluminio.....	5
Tabla 1.4 Propiedades de tracción en función del % de trabajado en frío en un aluminio con 99.999% de pureza. ....	7
Tabla 1.5 Propiedades mecánicas del aluminio puro a temperatura ambiente .....	7
Tabla 1.6 Sistema de clasificación para aleaciones de aluminio. ....	9
Tabla 1.7 Grados de endurecimiento para las aleaciones de aluminio... ..	9
Tabla 1.8 Propiedades mecánicas de las aleaciones típicas de aluminio. ....	12
Tabla 1.9 Composición química de la aleación de aluminio 6061-T6.....	15
Tabla 5.1 Espesores de capa y promedio de capas anódicas.....	117
Tabla 5.2 Condiciones generales para la puesta a punto de la máquina de ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco. ....	122
Tabla 5.3 Razón de desgaste y pérdida de peso de las probetas.. ..	125

## RESUMEN

El presente documento ha sido conducido con la finalidad de estudiar el efecto del anodizado sobre la razón de desgaste de una aleación de aluminio 6061-T6. Para ello, se ha diseñado y construido un sistema para la obtención de capas anódicas en una aleación de aluminio. Antes del anodizado se sometieron a las placas de aluminio a dos tipos de tratamientos, con el propósito de mejorar las superficies para el anodizado, el primero consistió en tratamiento mecánico y luego un tratamiento electroquímico de desengrasado en una solución de 5% de ácido sulfúrico en la que se sumergió la placa, luego se realizó un proceso de decapado por medio de soda cáustica, con el propósito de remover las impurezas superficiales de la aleación de aluminio. Para el anodizado se empleó una solución de 20% de ácido sulfúrico y 80% de agua destilada, se utilizaron como cátodo dos placas de aluminio de pureza comercial con espesor de 0.7 mm, área de los especímenes perimetral  $0.405366 \text{ dm}^2$ , volumen de la solución 2.65 lts, densidad de corriente 2.65 A, voltaje 15 v, períodos de tiempo de inmersión de 9, 15, 30, 45 y 60 min. El sellado de la capa anódica se realizó por medio de agua destilada a  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  por un periodo de 60 min, el cual sirve para mantener estable la capa anódica generada con el paso del tiempo. Se midieron los espesores de las capas anódicas naturales y artificiales, se realizaron ensayos de desgaste en probetas con capas anódicas naturales y artificiales.

Los resultados de los espesores de capa anódica obtenidos van desde  $12.65 \text{ }\mu\text{m}$ , promedios para tiempos de inmersión de 9 min, hasta los  $17.75 \text{ }\mu\text{m}$  para tiempos de inmersión de 60 min, así mismo la razón de desgaste para los tiempo de inmersión de 9 min fue de  $20 \times 10^{-3} \text{ cm}^3$  y para los tiempos de inmersión de 60 min se obtuvieron con espesores de capa promedio de, hasta valores de  $3 \times 10^{-3} \text{ cm}^3$ .

## INTRODUCCIÓN

El aluminio posee una combinación de propiedades, tales como su baja densidad de  $2.7 \text{ kg/m}^3$ , su alta resistencia a la corrosión, es buen conductor de la electricidad, se maquina con facilidad y es relativamente barato. Mediante la aleación y el trabajado en frío adecuado se puede aumentar marcadamente su resistencia mecánica hasta 690 MPa. Por todo esto, es el metal más utilizado después del acero.

El anodizado es una técnica utilizada para modificar la superficie del aluminio. Se conoce como anodizado a la formación de la capa protectora de óxido de aluminio, conocida como alúmina, la cual se puede producir natural o artificialmente mediante procedimientos electrolítico. La protección o el incremento en resistencia y durabilidad del aluminio, dependerá en gran medida del espesor de esta capa anódica.

El nombre del proceso deriva del hecho que la pieza a tratar está conectada al ánodo del circuito eléctrico en este proceso electrolítico. La anodización es usada frecuentemente para proteger el aluminio del desgaste y la corrosión, y también para aplicaciones decorativas cuando es coloreado en una amplia variedad.

Los espesores de las capas anódicas varían de acuerdo a los parámetros: densidad de corriente, temperatura, área superficial, volumen de la solución y tiempos de inmersión. En este caso el proceso de electrólisis se realizará para tiempos de inmersión diferentes de 9, 15, 30, 45 y 60 minutos, con el propósito de determinar como afecta el espesor de la capa anódica, a la razón de desgaste en la aleación de aluminio 6061–T6.

## **CAPÍTULO I**

### **1 MARCO TEÓRICO**

En este capítulo, se presentan las propiedades del aluminio y sus aleaciones en general, con el propósito de formar una idea de las características del material a trabajar y de sus propiedades físicas y químicas.

Además, se presentan los conceptos del proceso de anodizado, con las normas ambientales que afectan a éste.

El anodizado mejora las propiedades mecánicas de los aluminios y sus aleaciones, para este caso se trabajará con una aleación de aluminio 6061-T6, por ser ésta una de las más utilizadas en el país, por lo cual se presentan las aplicaciones de esta aleación anodizada.

#### **1.1 PROPIEDADES DEL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES**

El aluminio es un elemento químico, de símbolo Al y número atómico 13. Se trata de un metal no ferroso. Los compuestos de aluminio forman el 8% de la corteza de la Tierra y se encuentran presentes en la mayoría de las rocas, de la vegetación y de los animales. Como metal se extrae del mineral conocido con el nombre de bauxita, primero se transforma en alúmina mediante el proceso Bayer y a continuación en aluminio mediante electrólisis, el esquema del proceso se presenta en la Fig. 1.1<sup>18, 20 y 21</sup>.

El aluminio fue aislado por primera vez en 1825 por el físico danés H.C. Oersted. El principal inconveniente para su obtención reside en la elevada cantidad de energía eléctrica que requiere su producción. Este problema se compensa por su bajo costo de reciclado y su larga vida útil.

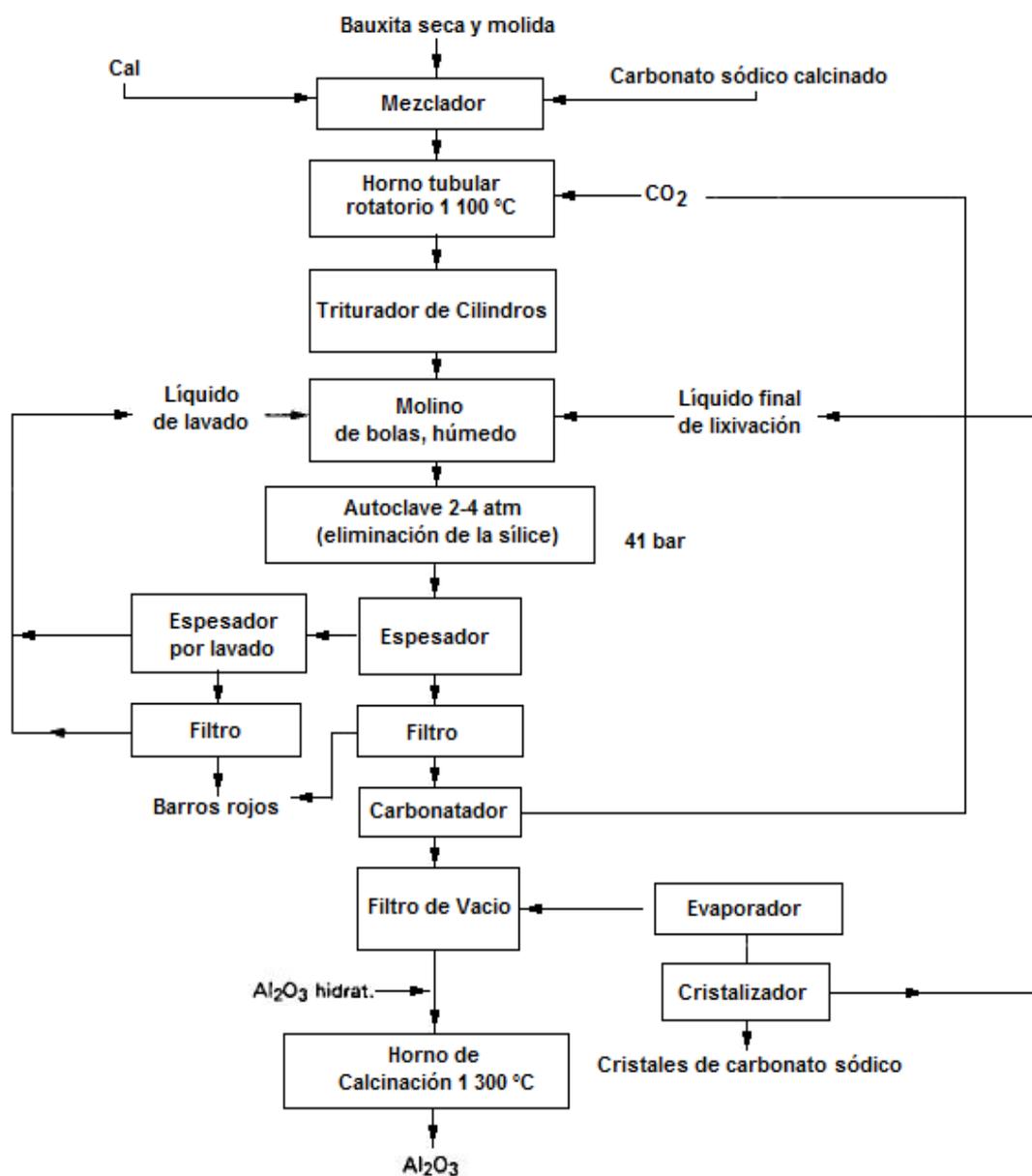


Fig. 1.1. Esquema de producción de aluminio por el método Bayer.

El desarrollo de energía eléctrica y del proceso Hall-Heroult para la reducción electrónica del  $Al_2O_3$  hacia metal líquido (Fig. 1.2) permitió que el aluminio se convirtiera en uno de los materiales de ingeniería más ampliamente utilizado y económico.

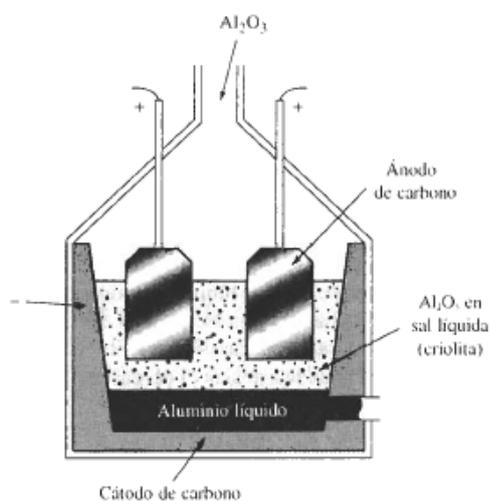


Fig. 1.2. Producción de aluminio en una celda electrolítica.

Tabla 1.1 Propiedades y costo de aleaciones no ferrosas más utilizadas

Metal	Densidad		Resistencia a la tensión, psi	Resistividad, $\Omega$ /pulg	Costo por libra, \$
	$g/cm^3$	$lb/pulg^3$			
Aluminio	2.70	0.097	83,000	$8.6 \times 10^3$	0.60
Berilio	1.85	0.067	55,000	$8.2 \times 10^3$	300.00
Cobre	8.93	0.322	150,000	$4.7 \times 10^3$	1.10
Plomo	11.36	0.410	10,000	$0.2 \times 10^3$	0.35
Magnesio	1.74	0.063	55,000	$8.7 \times 10^3$	1.40
Níquel	8.90	0.321	180,000	$5.6 \times 10^3$	4.10
Titanio	4.51	0.163	160,000	$9.8 \times 10^3$	5.50
Tungsteno	19.25	0.695	150,000	$2.2 \times 10^3$	10.00
Zinc	7.13	0.257	75,000	$2.9 \times 10^3$	0.55

Un factor de diseño es el costo del material, los cuales varían de manera considerable. Así, en la Tabla 1.1 se presentan para algunos metales los precios aproximados, en el país. Sin embargo, debe recordarse que el precio del material es solamente una pequeña parte del costo de un componente.

Además, en el costo se incluyen la fabricación, comercialización, distribución y terminado.

El aluminio posee una combinación de propiedades que lo hacen muy útil en ingeniería mecánica, tales como su baja densidad de  $2.7 \text{ kg/m}^3$  y su alta resistencia a la corrosión. Mediante la aleación adecuada se puede aumentar sensiblemente su resistencia mecánica (hasta los 690 MPa). Es buen conductor de la electricidad, se maquina con facilidad y es relativamente barato. Por todo ello es el metal que más se utiliza después del acero.

También, el aluminio responde satisfactoriamente a algunos mecanismos de endurecimiento. En la Tabla 1.2 se presentan las propiedades mecánicas del aluminio reconocido como puro con la de las aleaciones endurecidas mediante diversas técnicas. Unas aleaciones de aluminio pueden ser 30 veces más resistentes que el aluminio puro.

Tabla 1.2 Efectos de los maquinados de endurecimiento en el aluminio y sus aleaciones

Material	Resistencia a la tensión, Psi	Esfuerzo de cendencia, psi	Elongación, %	$\frac{\text{Límite elástico (aleación)}}{\text{Límite elástico (puro)}}$
Aluminio puro	6, 500	2, 500	60	
Aluminio puro comercial	13, 000	5, 000	45	2.0
Aleación de aluminio endurecida por solución sólida	16, 000	6, 000	35	2.4
Aluminio trabajado en frío	24, 000	22, 000	15	8.8
Aleación de aluminio endurecida por dispersión	42, 000	22, 000	35	8.8
Aleación de aluminio endurecida por envejecimiento	83, 000	73, 000	11	29.2

## CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Las propiedades físicas más importantes del aluminio son alta conductividad eléctrica y térmica, comportamiento no magnético y excelente resistencia a la corrosión. Este elemento reacciona con el oxígeno, incluso a temperatura ambiente, para poder producir una capa extremadamente delgada de óxido de aluminio que protege el metal interno de muchos entornos corrosivos.

Sin embargo, el aluminio no exhibe, un marcado endurecimiento, por lo que puede ocurrir falla por fatiga incluso a esfuerzos bajos. Debido a la baja temperatura de fusión, no trabaja bien a temperaturas elevadas. Finalmente, las aleaciones de aluminio tienen baja dureza, lo que conlleva a una mala resistencia al desgaste.

En la Tabla 1.3 se presenta un resumen de las propiedades físicas más características del aluminio puro. Algunas de estas propiedades varían según el contenido de impurezas.

Tabla 1.3 Resumen de las características físicas del aluminio

Propiedades	Valores
Color	Blanco-plata
Estructura cristalográfica	Cúbica centrada en las caras
Parámetro reticular a 25 °C	0.40414 nm
Densidad a 20 °C	2.699 g/cm <sup>3</sup>
Cambio volumétrico durante la solidificación	6.7%
Temperatura de fusión	660.2 °C
Temperatura de ebullición	2057 °C / 2480 °C
Calor específico a 20 °C	930 J
Coefficiente lineal de expansión térmico x10 <sup>6</sup>	23 (20-100 °C)
Conductividad térmica a 0 °C	209.3 W/m·K
Conductividad térmica a 100 °C	207 W/m·K
Resistividad eléctrica a 20 °C	2.69 μΩ·cm

## PROPIEDADES QUÍMICAS

El aluminio puro y sus aleaciones presentan una gran resistencia a la corrosión debido a la formación de una capa fina ( $\sim 4 - 5 \mu\text{m}$  de espesor) y adherente de óxido de aluminio sobre la superficie del metal. Esta capa constituye una película impermeable que impide la difusión del oxígeno hacia el metal base, haciendo al aluminio y sus aleaciones muy resistentes a la corrosión.

Sí en determinadas aplicaciones industriales se necesita una mayor resistencia a la corrosión, ésta se puede conseguir aumentando el espesor artificialmente de la capa por un procedimiento de oxidación profunda y, posteriormente, colmatado por inmersión en agua caliente.

Según el efecto que tienen los elementos aleantes sobre la resistencia a la corrosión del aluminio, éstos se pueden clasificar en:

- i) Elementos que la mejoran: cromo, magnesio y manganeso.
- ii) Elementos que la disminuyen: cobre, hierro, níquel, estaño, plomo y cobalto.
- iii) Elementos que tienen poca influencia: silicio, titanio, zinc, antimonio, cadmio y circonio.

## CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

Entre las características mecánicas del aluminio se tienen las siguientes:

- i) Fácil de maquinar.
- ii) Muy maleable y dúctil, permite la producción de láminas muy delgadas y filamentos.
- iii) Material blando (escala de Mohs: 2-3). Límite de resistencia a la tracción: 160-200 MPa en condición puro y en condición aleado en el intervalo de 1400-6000 MPa. El duraluminio es una aleación particularmente resistente.

- iv) Forma aleaciones con otros metales para mejorar las propiedades mecánicas.
- v) Permite la fabricación de piezas por fundición, forja y extrusión.
- vi) Soldable.

En la Tabla 1.4 se presenta el cambio de las propiedades mecánicas del aluminio en función del porcentaje de trabajado en frío aplicado, para un aluminio con pureza del 99.999%.

Tabla 1.4 Propiedades de tracción en función del % de trabajado en frío en un aluminio con 99.999% de pureza

Cantidad de trabajo en frío, %	Resistencia a la tracción, MPa	Resistencia a la fluencia, MPa	Elongación en 50 mm, %
0 (Recocido)	40 - 50	15 - 20	50 - 70
40	80 - 90	50 - 60	15 - 20
70	90 - 100	65 - 75	10 - 15
90	120 - 140	100 - 120	8 - 12

Las propiedades mecánicas del aluminio, varían de acuerdo a la pureza de éste, como se pueden observar en la Tabla 1.5 y en la Fig. 1.3.

Tabla 1.5 Propiedades mecánicas del aluminio puro a temperatura ambiente

Pureza, %	Esfuerzo de fluencia		Esfuerzo de tracción		Elongación en 50 mm, %	
	MPa	ksi	MPa	ksi		
99.99	10	1.4	45	6.5	50	65
99.80	20	2.9	60	8.7	45	55

Es importante destacar que una pequeña variación en el porcentaje de pureza del aluminio, influye en las propiedades de éste, si a esto se le agrega un tratamiento térmico o trabajado en frío, dicho esfuerzo cambia.

### 1.1.1 CLASIFICACIÓN DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO

Las aleaciones de aluminio se pueden dividir en dos grupos de importancia para forja y para fundición, dependiendo de su método de manufactura. Las aleaciones para forja que se conforman mediante deformación plástica tienen composiciones y microestructura significativamente distintas de las creadas para fundición, lo cual refleja los distintos requerimientos del proceso de manufactura<sup>19</sup>.

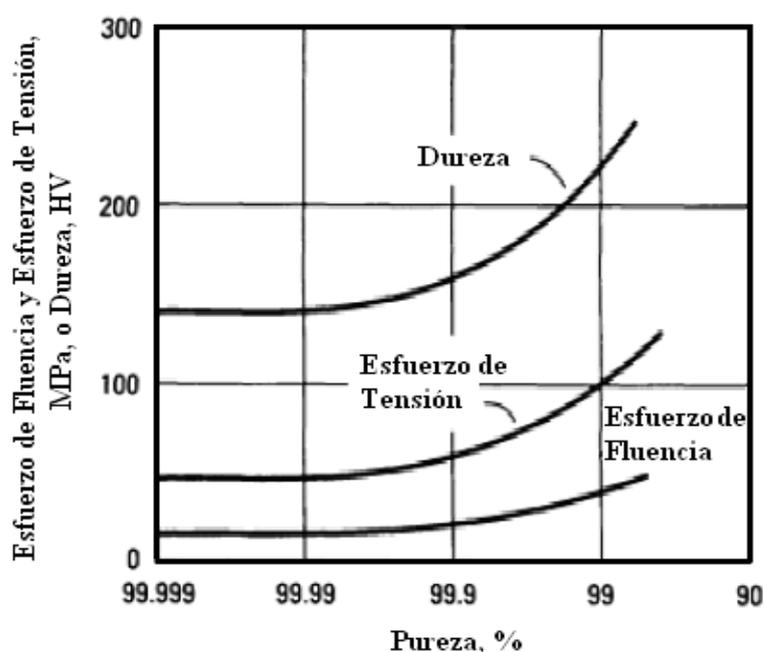


Fig. 1.3. Propiedades mecánicas en función de la pureza del aluminio.

Dentro de cada grupo principal se pueden dividir las aleaciones en dos subgrupos: las tratables térmicamente y las no tratables térmicamente.

Las aleaciones de aluminio se clasifican siguiendo el sistema de numeración que se presenta en la Tabla 1.6. El primer número define los principales

elementos de aleación y los números restantes se refieren a la composición específica de la misma.

El grado de endurecimiento se da mediante la clasificación de temple, T o H, dependiendo de que la aleación sea tratada térmicamente o endurecida por deformación (ver Tabla 1.7). Otras clasificaciones indican si es recocida O, tratada por solución W o utilizada tal y como fue fabricada (F).

Los números que siguen a la T o a la H indican la cantidad de endurecimiento por deformación, el tipo exacto de tratamiento térmico u otros aspectos especiales del procesamiento de la aleación.

TABLA 1.6 Sistema de clasificación para aleaciones de aluminio

<b>Aleaciones para forja:</b>		
1xxx Aluminio	Comercialmente puro ( $\geq 99\%Al$ )	No se endurece por envejecimiento
2xxx	Al-Cu y Al-Li	Se endurece por envejecimiento
3xxx	Al-Mn	No se endurece por envejecimiento
4xxx	Al-Si	No se endurece por envejecimiento
5xxx	Al-Mg	No se endurece por envejecimiento
6xxx	Al-Mg-Si	Se endurece por envejecimiento
7xxx	Al-Mg-Zn	Se endurece por envejecimiento
8xxx	Al-Li-Sn-Zn	Se endurece por envejecimiento
<b>Aleaciones para fundición:</b>		
1xx Aluminio	Comercialmente puro ( $\geq 99\%Al$ )	
2xx	Al-Cu	No se endurece por envejecimiento
3xx	Al-Si-Cu o Al-Mg-Si	Se endurece por envejecimiento
4xx	Al-Si	Algunos se endurecen por envejecimiento
5xx	Al-Mg	No se endurece por envejecimiento
6xx	Al-Mg-Si	Se endurece por envejecimiento
7xx	Al-Mg-Zn	No se endurece por envejecimiento
8xx	Al-Sn	Se endurece por envejecimiento

## CLASIFICACIONES

### ALEACIONES PARA FORJA

Las aleaciones de aluminio para forja de las series 1xxx, 3xxx, 5xxx y la mayor parte de las 4xxx no se endurecen por envejecimiento. Las aleaciones de aluminio de las series 1xxx y 3xxx de una sola fase, excepto por la presencia de pequeñas cantidades de otros elementos presentes o de componentes intermetálicos. Sus propiedades quedan controladas por endurecimiento por deformación, endurecimiento por solución sólida y control de tamaño de grano. Sin embargo, debido a que a temperatura ambiente la solubilidad de los elementos de aleación y de aluminio es pequeña, el grado de endurecimiento por solución sólida resulta limitado.

Las aleaciones 5xxx contienen dos fases a temperatura ambiente: primero  $\alpha$ , una solución sólida de magnesio en el aluminio, y en segundo  $Mg_2Al_3$ , un compuesto intermetálico duro y frágil. Sin embargo, el  $Mg_2Al_3$  no es coherente, con la matriz, por lo cual, no se puede endurecer por envejecimiento. Las aleaciones aluminio-magnesio se pueden endurecer mediante cuatro métodos: dispersión fina del  $Mg_2Al_3$ , endurecimiento por deformación, por solución sólida y finalmente, por control del tamaño del grano.

Las aleaciones de las series 2xxx, 6xxx y 7xxx son endurecibles por envejecimiento. Aunque se obtienen una resistividad excelentes con estas aleaciones, la cantidad de precipitado que pueden formar es limitada. Además, no se puede utilizar a temperaturas por encima de 175 °C una vez envejecidas.

Tabla 1.7 Grados de endurecimiento para las aleaciones de aluminio

<b>F</b>	Tal como se fabricó (trabajo en caliente, forja, fundición, etc.)
<b>O</b>	Recocido (en el estado más blando posible)
<b>H</b>	Trabajado en frío
H1x	Trabajado en frío solamente (la x se refiere a la cantidad de trabajo en frío y endurecimiento)
H12	Trabajo en frío que proporciona una resistencia a la tracción intermedia O y H14
H14	Trabajo en frío que aporta una resistencia a la tracción intermedia O y H18
H16	Trabajo en frío que proporciona una resistencia a la tracción intermedia entre H14 y H18
H18	Trabajo en frío que resulta en una reducción de aproximadamente 75%
H19	Trabajo en frío que proporciona una resistencia a la tracción superior a los 2000 psi de la obtenida mediante el H18
H2x	Trabajo en frío y parcialmente reconocida
H3x	Trabajo en frío y estabilizado a una temperatura baja, para evitar endurecimiento por envejecimiento de la estructura
<b>W</b>	Tratada por solución
<b>T</b>	Endurecida por envejecimiento
T2	Enfriada desde la temperatura de fabricación, trabajada en frío y envejecida naturalmente
T3	Tratada por solución trabajada en frío y envejecida naturalmente
T4	Tratada por solución y envejecida naturalmente
T5	Enfriada desde la temperatura de fabricación y envejecida artificialmente.
<b>T6</b>	<b>Tratada por solución y envejecida artificialmente</b>
T7	Tratada por solución, estabilizada por sobre envejecimiento
T8	Tratada por solución, trabajada en frío y envejecida artificialmente
T9	Tratada por solución; envejecida artificialmente y trabajada en frío
T10	Enfriada desde la temperatura de fabricación, trabajada en frío y artificialmente envejecida

## **Aleaciones para fundición**

Las aleaciones de aluminio para fundición más comunes se presentan en la Tabla 1.6, contienen suficiente silicio para formar una fase eutéctica de baja temperatura de fusión, con el fin de mejorar la fluidez de la aleación.

Las propiedades de las aleaciones aluminio-silicio se controlan mediante el endurecimiento por solución sólida de la matriz de aluminio  $\alpha$ , con endurecimiento por dispersión de a fase  $\beta$ . También, con la velocidad de solidificación se controla el tamaño y forma del grano primario así como la naturaleza del microconstituyente eutéctico.

Existen métodos que pueden ser aplicados a ciertas aleaciones para, refinar la microestructura e incrementar el grado de endurecimiento por dispersión. El enfriamiento rápido obtenido en la fundición a presión o en molde permanente incrementan la resistencia mecánica al refinar el tamaño de grano y de los microconstituyentes, y también se puede efectuar utilizando adiciones de boro y de titanio. Al modificar la aleación mediante sodio o estroncio se cambia la estructura eutéctica, y al utilizar fósforo se endurece por refinamiento del silicio primario. Muchas aleaciones también contienen cobre, magnesio o zinc, lo que permite el endurecimiento por envejecimiento.

## **Aleaciones modernas de aluminio**

Varias mejoras sobre las aleaciones convencionales de aluminio y sobre los métodos de manufactura han ampliado la utilidad de este metal. Se han introducido aleaciones que contienen litio, particularmente para la industria aeroespacial. El litio tiene una densidad de  $0.534 \text{ g/cm}^3$ , en consecuencia, la densidad de las aleaciones Al -Li puede tener una densidad de 10% menor que la de las tradicionales.

Así mismo, aumenta el módulo de elasticidad y la resistencia a la tracción puede ser igual o mayor que la de las convencionales (ver aleación 2090 de la Tabla 1.8). La baja densidad hace que la resistividad sea excelente. Estas aleaciones tienen un mejor comportamiento a la fatiga, debido a una baja velocidad de crecimiento de grietas por fatiga, y una buena tenacidad a temperaturas criogénicas. También, son superplásticos por lo cual se les encuentra en aplicaciones de pisos, cubiertas y bastidores de aeronaves militares y comerciales.

La alta resistencia de las aleaciones Al-Li es el resultado del endurecimiento por envejecimiento. Las que contienen hasta 2.5% Li se pueden tratar térmicamente con los métodos convencionales. También, un proceso de solidificación rápida es posible al introducir una mayor cantidad de Li (hasta un 4%), incrementando aún más la ligereza y la resistencia a la tracción.

Los métodos modernos de manufactura ayudan a mejorar la resistencia de las aleaciones de aluminio, particularmente a temperaturas elevadas. El proceso de solidificación rápida, en la cual en la aleación líquida, se forman pequeños granos solidificando velozmente, se combina con la metalurgia de polvos en la producción y fabricación de nuevas aleaciones.

Existe un grupo de aleaciones de aluminio que contiene elementos de transición como el hierro y el cromo, además de minúsculos compuestos inter metálicos (dispersoides) como el Al-Fe. Aunque las propiedades de estas avanzadas aleaciones a temperatura ambiente son parecidas a las convencionales, los dispersoide son estables a temperaturas más altas, consiguiendo así buenas propiedades a temperatura donde, de otra forma, ocurriría sobre envejecimiento. Las aplicaciones potenciales incluye una diversidad de componentes estructurales aeroespaciales.

Igualmente las aleaciones de aluminio se procesan mediante tixovaciado; la aleación de aluminio es agitada vigorosamente durante la solidificación, para dividir la estructura dendrítica en pequeños granos redondos de aluminio primario, rodeados por un microconstituyente eutéctico.

El lingote producido durante este proceso es posteriormente recalentado entre las temperaturas correspondientes a la línea líquidus y eutéctica. Cuando se le aplica presión la parte de aleación líquida y sólida fluyen en un molde, o en un lado, a presión como si toda fuera líquida, produciendo un componente terminado con una microestructura uniforme y un mínimo de defectos de fundición. Mediante este proceso se pueden producir componentes automotrices, incluyendo pistones y ruedas.

Las aleaciones de aluminio también se utilizan como material de matriz de compuestos de matriz metálica (MMC, por sus siglas en inglés). La introducción de materiales de refuerzo no metálicos, como fibras de boro o partículas de carburo de silicio, mejoran las propiedades de dureza a altas temperaturas.

En la Tabla 1.8 se presentan algunas aleaciones típicas para forja no tratadas térmicamente, tratadas térmicamente y para fundición con sus correspondientes aplicaciones.

Tabla 1.8 Propiedades mecánicas de las aleaciones típicas de aluminio

Aleación	Resistencia a la tracción, psi	Esfuerzo de fluencia, psi	Elongación en 2 pulg, %	Aplicaciones
<b>Aleaciones para forja no tratadas térmicamente</b>				
1100-O >99% Al	13,000	5,000	40	Componentes eléctricos, forja procesamiento de alimentos
1100-h18	24,000	22,000	10	
3004-O 1.2% Mn - 1.0% Mg	26,000	10,000	25	Cuerpos de lata bebidas, usos arquitectónicos
3004-H18	41,000	36,000	9	
4043-O 5.2% Si	21,000	10,000	22	Metal de aporte de soldadura
4043-H18	41,000	39,000	1	
5182-O 4.5% Mg	42,000	19,000	25	Tapas de las latas de bebidas, componentes marinos
5182-H19	61,000	57,000	4	
<b>Aleaciones para forja tratables térmicamente</b>				
2024-T4 4.4% Cu	68,000	47,000	20	Ruedas de camión
2090-T4 2.4% Li - 2.7% Cu	80,000	75,000	6	Lámina externa de aeronaves
4032-T6 12% Si - 1% Mg	55,000	46,000	9	Pistones
6061-T6 1% Mg - 0.6% Si	45,000	40,000	15	Canoas, carros de ferrocarril
7075-T6 5.6% Zn - 2.5% Mg	83,000	73,000	11	Bastidores de aeronaves
<b>Aleaciones para fundición</b>				
201-T6 4.5% Cu	70,000	63,000	7	Carcasas de transmisiones
319-F 6% Si - 0.3% Mg	27,000	18,000	2	Fundiciones de uso general
356-T6 7% Si - 0.3% Cu	33,000	24,000	3	Acoplamiento para aeronaves
380-F 8.5% Si - 3.5% Cu	45,000	23,000	3	Carcasas para motor
390-F 17% Si - 4.5% Cu	41,000	35,000	1	Motores automotrices
443-F 5.2% Si (Fundición en arena, molde permanente o fundición a presión)	19,000	8,000	8	Equipo para manejo de alimentos, acoplamiento marinos
	23,000	9,000	10	
	33,000	16,000	9	

### 1.1.2 PROPIEDADES DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO 6061-T6

La composición química de la aleación de aluminio 6061-T6, se presenta en la tabla 1.9<sup>20</sup>.

Tabla 1.9 Composición química de la aleación de aluminio 6061-T6

<b>Elementos</b>	<b>Si</b>	<b>Cu</b>	<b>Mg</b>	<b>Cr</b>
% en peso	0.4	0.15	0.8	0.04

El aluminio 6061-T6 tiene como principales propiedades las siguientes:

- i) Resistencia a la tracción: 45,000 psi
- ii) Resistencia de fluencia: 40,000 psi
- iii) Elongación en 2 pulg: 10%
- iv) Dureza: 95 Brinell
- v) Excelente maquinabilidad
- vi) Buena estabilidad, con excelente acabado superficial
- vii) Alta resistencia a la corrosión y al desgaste
- viii) Soldable
- ix) Densidad de 2.7 g/cm<sup>3</sup>.

El aluminio 6061-T6 es ideal para la elaboración de piezas maquinadas con excelente acabado superficial.

#### **Tratamiento Térmico T6, aplicado a la aleación**

Tratado térmicamente por solución y envejecida artificialmente, el cual se realiza a temperatura entre 520 y 530 °C, el tratamiento T6 ayuda a la reducción de porosidad y mejora la homogeneidad de la microestructura.

**Ventajas:**

Adicionalmente a sus características naturales (excelente conductividad, ligereza, no tóxico y que no produce chispa), el aluminio 6061-T6 ofrece las siguientes ventajas:

- i) Resistencia superior a la de las aleaciones 6063 (31.9 ksi)
- ii) Envejecido artificialmente
- iii) Óptima conformación en frío
- iv) Excelentes características para soldadura fuerte y al arco.

**Beneficios:**

- i) Excelente resistencia a la corrosión
- ii) Gran resistencia a la tracción
- iii) Excelente maquinabilidad.

**Aplicaciones:**

- i) Portamoldes y portatroqueles
- ii) Moldes prototipos
- iii) Moldes de producción para moldeado por soplado, inyección y al vacío
- iv) Partes de maquinaria.

**1.2 ANODIZADO**

Es una técnica utilizada para modificar la superficie del aluminio. Se conoce como anodizado a la formación de la capa de protectora de óxido de aluminio, conocida como alúmina, la cual se puede producir natural o artificialmente mediante procedimientos electrolítico, de manera que se consigue una mayor resistencia y durabilidad del aluminio<sup>2,5,11</sup>.

Con estos procedimientos se consigue la oxidación de la superficie del aluminio, creando una capa de alúmina que protege la pieza. La protección del aluminio dependerá en gran medida del espesor de esta capa.

El ácido clorhídrico, fluorhídrico y sulfúrico concentrado pueden atacar fácilmente al aluminio y a sus aleaciones, mientras que en soluciones de ácido nítrico, amoníaco y en la mayoría de ácidos orgánicos reaccionan ligeramente. La resistencia al ataque del aluminio depende de la composición química y concentración de la solución así como de la pureza del metal. Por ejemplo, en ácido nítrico, el aluminio de pureza 99.99%, es mucho más resistente al ataque que el aluminio de pureza 99.5%. Aleantes como el silicio o el zinc hasta 1 % afectan muy débilmente sobre la resistencia a la corrosión, mientras variaciones del 0.1% con aleantes como el cobre o el níquel, de elevado número atómico, afectan fuertemente la resistencia a la corrosión.

El nombre del proceso deriva del hecho que la pieza a tratar está conectada al ánodo del circuito eléctrico en este proceso electrolítico. La anodización es usada frecuentemente para proteger el aluminio y el titanio de la abrasión y la corrosión, y también para poder ser coloreado en una amplia variedad.

Las técnicas de anodizado han evolucionado mucho con el paso del tiempo y la competencia de los mercados, por lo que se pasa de una capa de óxido de aluminio con el color gris propio de este óxido hasta la coloración posterior a la formación de la capa, obteniendo colores tales como oro, bronce, negro y rojo. Las últimas técnicas basadas en procesos de interferencia óptica pueden proporcionar acabados tales como azul, gris perla y verde.

### 1.2.1 CONCEPTOS DE ANODIZADO

El crecimiento de capas de óxido de aluminio mediante la aplicación de voltajes anódicos en diferentes electrolitos produce fenómenos de protección de oxidación. Estas capas de óxido se clasifican en dos tipos: capas tipo barrera y capas tipo poroso. Las primeras cuando se generan a corriente constante se caracterizan por un aumento del voltaje aproximadamente lineal con el tiempo, desde el inicio del anodizado hasta llegar a un voltaje de ruptura. Estas películas tienen baja conductividad electrónica, pero una alta conductividad iónica, por lo tanto, bajo la influencia de un campo eléctrico, la conducción iónica es el modo predominante de transporte de carga. Estas películas son generalmente compactas y con espesores uniformes. Por el contrario, las películas de tipo porosa se forman debido a que el electrolito tiene una acción apreciable sobre la película de óxido, provocando cierto grado de solubilización y por lo tanto, porosidad en la interfase óxido/electrolito. Estas películas se forman en soluciones acuosas de ciertos ácidos.

### 1.2.2 TIPOS DE ANODIZADO

Las clasificaciones de tipos de anodizado, se basan principalmente en los espesores de capa generadas a partir del proceso. Sin importar el medio acuoso donde se desarrolla el proceso, y sin tomar en cuenta los tiempo o corrientes aplicadas en el proceso<sup>2,3,5 y 7</sup>.

Los anodizados se clasifican básicamente en 2 tipos:

- i) Anodizado blando, que consiste en tener espesores de capa  $\leq 30 \mu\text{m}$ , son utilizadas para aplicaciones estéticas y decorativas como perfiles.
- ii) Anodizado duro, el cual consiste en espesores de capa de 30 hasta  $100 \mu\text{m}$ , son utilizados en aplicaciones industriales, por el aumento de las propiedades mecánicas.

Los límites entre el anodizado blando y duro dependen en gran medida de los grupos de investigadores u empresas que realice el proceso y los espesores de capas mayores de 100  $\mu\text{m}$  no entran en ninguna clasificación pero se considera como anodizado duro.

### **1.2.3 HISTORIA DEL ANODIZADO EN EL SALVADOR**

El anodizado se inicia en El Salvador a la segunda mitad del siglo XX; cuando en otras latitudes del mundo los ensayos con el anodizado comenzaron en los años cincuenta en acabado natural, con un pulido previo, bajos espesores de capa y poco sellado. En esa época, no existían perfiles de aluminio extruido, por lo que se utilizaban productos laminados a los que se les daba la forma necesaria para cada aplicación.

Al inicio de los años sesenta, nacen las primeras empresas que se dedican industrialmente al trabajo con aluminio como son Aluminios de El Salvador S.A (ALSASA) y Aluminios de Centro América (ALDECA), son estas empresas las pioneras en cuanto al anodizado en el país. La instalación de estas plantas coincide con la instalación de las primeras prensas de extrusión y empiezan a ofrecer trabajos en aluminio. En 1964, las empresas de España, crearon una “agrupación de empresas sin responsabilidad” que fue la base de las asociaciones existentes en cuanto a las empresas que trabajan el aluminio.

En los primeros años del nuevo milenio se introduce la coloración con el sistema ANOLOK, el cual se utiliza en Europa desde los años 70; después de la década de los setenta; Europa continuó avanzando en crear de más tecnología para los procesos de anodizado es así cómo crean un pretratamiento mecánico de lijado o esmerilado y otro, posterior al anodizado, el repulido, acabados que únicamente se ofrecen en España. En 1974, la Asociación de Anodizadores de

España (ASESAN), invierte en la investigación con el fin de mejorar los procesos de anodizado.

En 1977 se instala en España la primera planta de lacado, y a partir de los años ochenta, el ritmo de creación de nuevas empresas de lacado, es frenético.

Es claro que las empresas dedicadas al ramo del anodizado en el país están comenzando en cuanto a los adelantos tecnológicos tanto en materiales como reactivos para el aprovechamiento de las propiedades del aluminio.

En los últimos años ha renacido el anodizado, el cual ha renovado sus instalaciones y ha incrementado de forma importante su capacidad productiva. En este momento se tienen dos empresas grandes dedicadas al anodizado del aluminio. También, existen muchas asociaciones de empresas anodizadoras alrededor del mundo las cuales en su mayoría se rigen por las normas ASTM.

La mayoría de las empresas que no forman parte de ninguna asociación tienen instalaciones pequeñas y trabajan para el sector informal muchas veces. Entre estas microempresas se puede mencionar la empresa de Don Oscar Morán, la cual se dedica al proceso de anodizado de placas para aplicaciones serigráficas, de diferentes empresas.

A finales de los años 90 y principios de la década actual, las empresas de anodizado han lanzado al mercado nuevas gamas de colores basados en la interferencia óptica, algunos de los cuales (azules, verdes, grises) ya están plenamente implantados, mientras que otros están aún en fase de desarrollo.

El sector del tratamiento de superficies de aluminio ha experimentado en los últimos años un gran crecimiento. Incluso en la actualidad son numerosas las instalaciones de anodizado y lacado que tienen en sus proyectos estos tratamientos con el fin de aumentar su capacidad productiva. La colaboración

de los proveedores ofreciendo nuevas tecnologías y sistemas de trabajo propicia este desarrollo. El auge experimentado por el sector de la extrusión de aluminio, es probablemente el origen de este crecimiento.

### **Evolución de la industria**

Las nuevas aplicaciones del aluminio, dirigidas a sectores en fuerte expansión hacen pensar que también en éste habrá una importante demanda a mediano plazo.

Todos estos datos permiten afrontar con optimismo el futuro del sector de anodizado, por lo cual, obliga al sector en nuestro país a buscar como optimizar sus procesos y mejorar así la calidad del anodizado en los productos. Además, se debe de invertir en nuevas investigación y desarrollo, necesarias para seguir avanzando e innovando, sin perder de vista el componente ecológico.

### **Aplicaciones más usuales de los aluminios anodizados**

La construcción (63.3%), la industria metalmecánica (21.9%), el transporte (8.6%) y la automoción (6.3%) son los principales sectores en los que encuentran aplicación los perfiles extruidos de aleación de aluminio.

### **Destino de la producción nacional de productos anodizados**

Un 75.8% de la producción, se destinó al mercado regional centroamericano, según las empresas nacionales ALSASA y ALDECA, el cual se abasteció también con materia prima procedente de la importación.

### **Acabados**

En el momento de elegir los acabados para estos perfiles, se debe tener en cuenta, que aproximadamente un 15% de los perfiles extruidos se emplean en

aplicaciones que no requieren una especial protección y por ello se utilizan sin acabado. Para el restante 85%, los acabados más utilizados son, por este orden, en polvo, el anodizado y la decoración imitando madera.

### **Anodizado**

A lo largo de los años de anodizado en el país estos han tratado, en total, una gran cantidad de toneladas de aluminio y sus aleaciones destinadas en su mayor parte a la fabricación de artículos domésticos como son ollas, vasos, cacerolas etc. y en una menor cantidad a la anodización de perfiles para usos estéticos en la industria.

#### **1.2.4 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE ANODIZADO**

La protección anódica está fundamentada en la pasivación de un metal cuando se le somete a un potencial más positivo que el de corrosión,  $E^\circ$ . Para ciertos metales y electrolitos sucede lo indicado en la Fig. 1.4. Al aumentar el potencial,  $U^e$ , aumenta fuertemente la oxidación hasta alcanzar una intensidad máxima,  $i_{crit}$ . A partir de este punto y para pequeños incrementos de  $U^e$  la densidad de corriente disminuye hasta la  $i$  pasiva,  $i_{ps}$ , que indica unos valores bajos de corrosión. Este bajo nivel de oxidación se mantiene para valores de la tensión mayores a  $U_p$ , pero no tanto para llegar a la destrucción de la capa pasiva, transpasiva<sup>19, 7, 8 y 9</sup>.

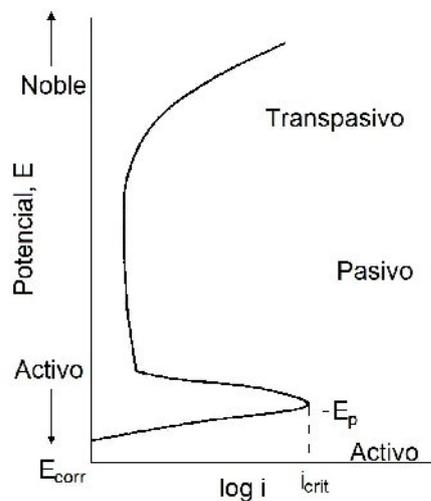


Fig. 1.4. Curvas potencioestáticas de oxidación anódica.

Los electrolitos que pueden proteger cada metal o aleación son seleccionados de acuerdo con los que los pasivan.

En la Fig. 1.5 se presenta el esquema del proceso de polarización anódica con un electrolito que alcanza la zona de pasivación del metal.

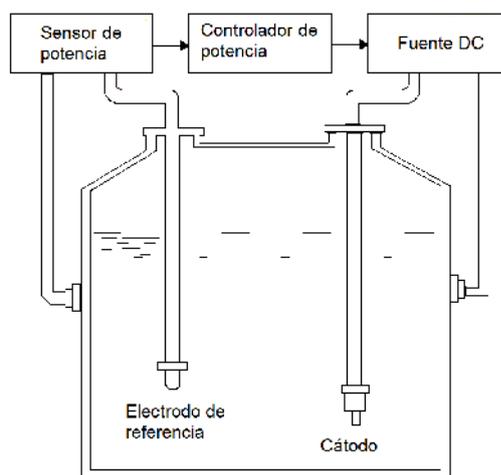


Fig. 1.5. Proceso de polarización anódica.

El proceso por el que se consigue la protección anódica se denomina anodizado, siendo el que se aplica al aluminio uno de los más significativos. Las capas de óxido de aluminio, presentan una gran resistencia a la corrosión y constituyen una base excelente para una posterior coloración.

## FUNDAMENTOS DEL PROCESO

El anodizado del aluminio es un método electrofítico para convertir el aluminio de la superficie en óxido de aluminio,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . El proceso electrofítico presenta la variante de que en éste el aluminio actúa de ánodo en la celda de electrólisis. Se produce, por lo tanto, la reacción de oxidación sobre el aluminio y provoca la formación de capas de óxido de aluminio más gruesas sobre la superficie del metal. Esta capa de óxido, llamada capa anódica o anodizada, se forma a expensas del mismo metal.

Varios electrolitos son usados para producir la oxidación del metal. Los más comunes son el ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) y ácido crómico ( $\text{HCrO}_3$ ), aunque con diversas concentraciones que determinan procesos diferenciados.

La estructura y características de la capa anódica puede modificarse en función de diferentes parámetros: Naturaleza del electrolito, composición, temperatura del electrolito, tiempo de tratamiento y voltaje de aplicación.

El mecanismo de oxidación anódica es complejo. Por estudios de microscopía electrónica se ha observado que la película anodizada está formada por 2 capas. Una capa interna fina, densa, dieléctricamente y compacta, llamada capa barrera o capa dieléctrica, que corresponde entre 0.1 a 2 % del espesor total de la capa anódica. Su espesor depende de la composición del electrolito y de las condiciones de trabajo: voltaje, tiempo, temperatura, entre otros. En la Fig. 1.6 se presenta un esquema del corte de la capa anódica descrita.

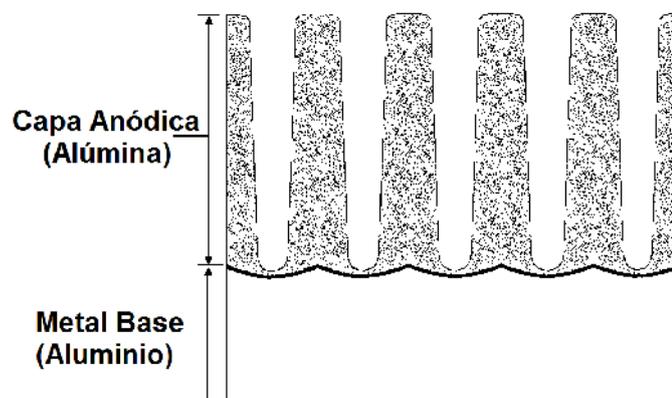


Fig. 1.6. Sección esquemática de la capa barrera o anódica.

Esta capa barrera se forma en los primeros minutos del proceso de anodizado a una elevada tensión. Su espesor varía directamente con el voltaje de trabajo e inversamente con la velocidad de disolución del óxido en el electrolito. Esta capa barrera no es porosa y conduce la corriente a causa de su delgadez y defectos microestructurales.

Sobre la capa barrera se forma una capa porosa o capa externa, la cual tiene punto de crecimiento en la parte inferior de los poros, siendo el ión aluminio el que emigra a través de la capa barrera. Los poros que se van formando son en forma de celdillas paralelas y normales a la superficie del metal.

La porosidad de la capa externa, así como su espesor, varía con la velocidad de disolución por parte del electrolito y con la velocidad de crecimiento en el proceso de oxidación, dependiendo ambos factores del tipo de electrolito y condiciones de trabajo. El número de poros y su volumen dependen en gran medida del voltaje de formación y el tipo de electrolito.

En la Fig. 1.7 se presenta la correlación entre la densidad de poros y voltajes de operación para los medios  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (15%) y  $\text{HCrO}_3$  (3%)

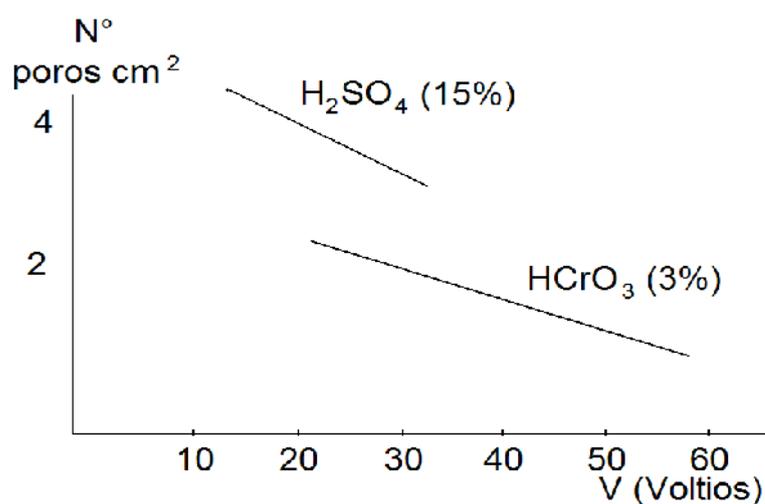


Fig. 1.7. Correlación entre la densidad de poros y voltajes de operación del anodizado.

Como los poros son siempre un camino más fácil para los procesos corrosivos, la completa protección anódica requiere la eliminación de los poros. En el caso del aluminio se logra en la operación de sellado, el cual consiste básicamente en la hidratación de la alúmina por inmersión en agua caliente.

### CARACTERIZACIÓN DE LA CAPA ANÓDICA

Se describen las variables de control de la capa que permite analizar la bondad de los procesos:

- i) Apariencia externa: Debe ser continua en color y grano. Discontinuidades como rayas o manchas representan defectos de tipo decorativos.

- ii) Resistencia a la corrosión: Se ensaya con la cámara de niebla salina, habitualmente 336 horas y se observa las picaduras de corrosión.
- iii) Resistencia al desgaste: Se ensaya con un ciclo abrasivo midiendo la pérdida de peso en la abrasión.
- iv) Espesor de la capa de óxido: Se determina bien por métodos de observación al microscopio por una sección de perfil de capa, o también por ensayos no destructivos basados en corriente de Eddy.

## **PROCESO DE ANODIZADO GLOBAL**

El proceso completo de anodizado requiere, como en los electrolíticos, unas etapas de limpieza del metal para la ejecución del proceso de oxidación. Así, se aplican tratamientos químicos de desengrase con disolventes y productos cáusticos.

Después del tratamiento de anodizado intrínseco constituye el núcleo central y el proceso de sellado es alternativo en el proceso, así como el de coloración previo al sellado con objetivos decorativos. En la Fig. 1.8 se presenta un esquema de los diversos caminos posibles.

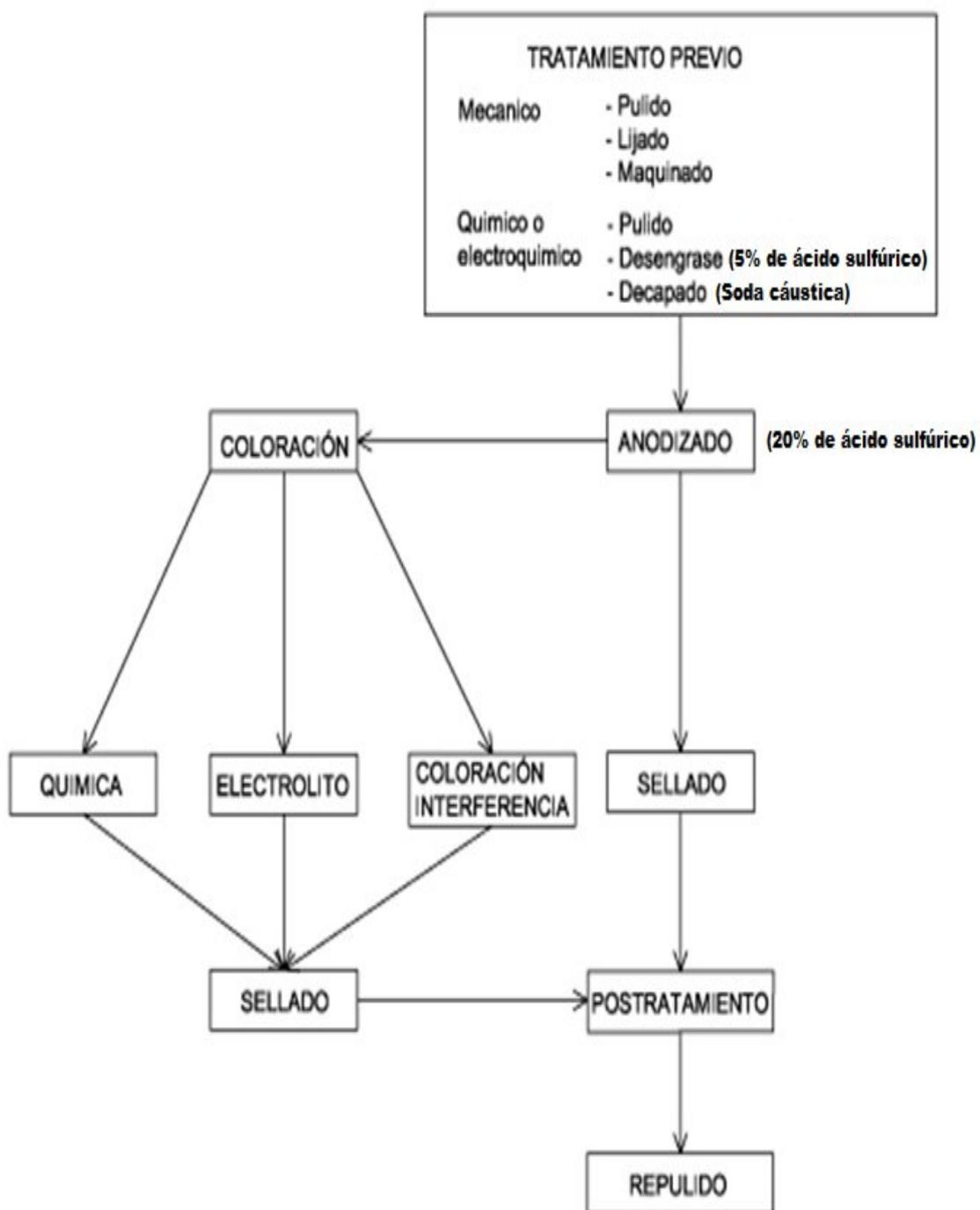


Fig. 1.8. Esquema del proceso de anodizado.

## **ETAPAS DE ANODIZADO**

Se citan las dos variables de electrolitos más utilizados: ácido sulfúrico y ácido crómico

### **ELECTRÓLITO DE ÁCIDO SULFÚRICO**

El proceso de anodizado más ampliamente utilizado es el que se utiliza como electrolito una solución de ácido sulfúrico, entre 15 a 20 %.

En el proceso estándar las densidades de corriente oscilan entre 1 a 1.8 A/dm<sup>2</sup> y entre 14 a 20 V de corriente continua. Los baños de anodizado para conseguir capas de buenas características de protección y decorativas trabajan a temperaturas de 20 °C y el proceso dura entre 10 a 60 min, obteniendo espesores entre 5 a 30 μm según condiciones de trabajo empleadas. Su espesor está limitado por la solubilidad relativamente alta del electrolito.

Los recubrimientos obtenidos en ácido sulfúrico son incoloros sobre aluminio sin alear y gran parte de sus aleaciones de Al-Mg. Para aleaciones con alto contenido de Mn o Si, el recubrimiento resulta grisáceo.

Los parámetros de trabajo influyen en las propiedades del recubrimiento. Las soluciones diluidas y temperaturas más bajas dan lugar a recubrimientos duros y soluciones más concentradas con aumento de temperatura o tiempo, que son factores que facilitan la disolución del recubrimiento que se va formando, da lugar a recubrimientos blandos.

En los tanques de electrólisis se emplean generalmente cátodos de plomo o aluminio y deben estar previstos sistemas de refrigeración y agitación durante el proceso de tratamiento.

## **ANODIZADO DURO**

Para aplicaciones especiales en la que se buscan principalmente determinadas características mecánicas como dureza, resistencia al desgaste, entre otras, se utilizan técnicas especiales de anodizado conocidas como anodizado duro.

En el proceso de anodizado se dice que se alcanza un espesor límite cuando la velocidad de la disolución química de la capa por parte del electrólito se iguala a la velocidad de crecimiento del mismo, la que se hace más lenta a medida que aumenta el espesor de la capa anódica por ser aislante. La producción de capas de anodizado de alto espesor está favorecida si se utilizan electrolitos de bajo poder de disolución, bajas temperaturas y densidades de corriente o voltajes altos.

En la práctica, la mayoría de las plantas industriales que realizan anodizado duro lo llevan a cabo en baños de ácido sulfúrico, diluidos que en el anodizado convencional, entre 5 a 15 %, aplicando densidades de corriente de  $3 \text{ A/dm}^2$  y a temperaturas entre 0 a 5 °C.

Las aplicaciones del anodizado duro para el aluminio crecen rápidamente, el cual es utilizado para piezas como pistones, cilindros, piezas de avión y ferrocarriles, válvulas neumáticas, entre otras, principalmente en piezas que van a someterse a fricción.

## **ELECTRÓLITO DE ÁCIDO CRÓMICO**

De todos los procedimientos de anodizado el primero que se desarrolló fue una solución de ácido crómico en el año 1923, se utilizó para proteger las placas de aluminio de los hidroaviones. Este proceso produce capas muy finas pero sin embargo muy resistentes a la corrosión.

Este tipo de proceso encuentra gran aplicación en el anodizado de piezas de la industria aeronáutica y para equipos navales.

Las capas producidas en este electrólito generalmente son densas (poco porosas), opacas (grises e iridiscentes), dependiendo de la concentración y grado de pureza del electrólito. Por lo tanto, no se aplica este proceso para obtención de capas que luego van a colorearse con fines decorativos.

El proceso estándar opera con concentraciones de 50 a 100 g/l de  $\text{CrO}_3$ , temperaturas de 35 °C, voltaje de 40 V y densidades de corriente del orden de 0.2 A/dm<sup>2</sup>. Se alcanzan espesores de 2 μm durante 40 min.

El anodizado en ácido crómico encuentra sus principales aplicaciones en conjuntos que presentan dificultad al lavado, como conjuntos remachados o materiales porosas. También, cuando se requiere un mejor mantenimiento de las dimensiones de la pieza.

## **SELLADO DE LA CAPA ANÓDICA DEL ALUMINIO**

Existen dos métodos para el sellado de la capa anodizada: por agua caliente y con vapor.

- i) El sellado por agua caliente consiste en introducir el aluminio anodizado, una vez bien enjuagado, en baño de agua desionizada caliente, entre 95 a 98 °C, durante un período de tiempo que oscila entre 2 a 3 min por cada 1 μm de espesor de la capa anódica.

Durante el proceso de sellado se produce la hidratación de la alúmina, formándose la boehmita ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ ). Esta transformación a la forma

hidratada va acompañada de un aumento de volumen el cual cierra la estructura porosa.

El mecanismo que tiene lugar se puede ver en la Fig. 1.9a-d.

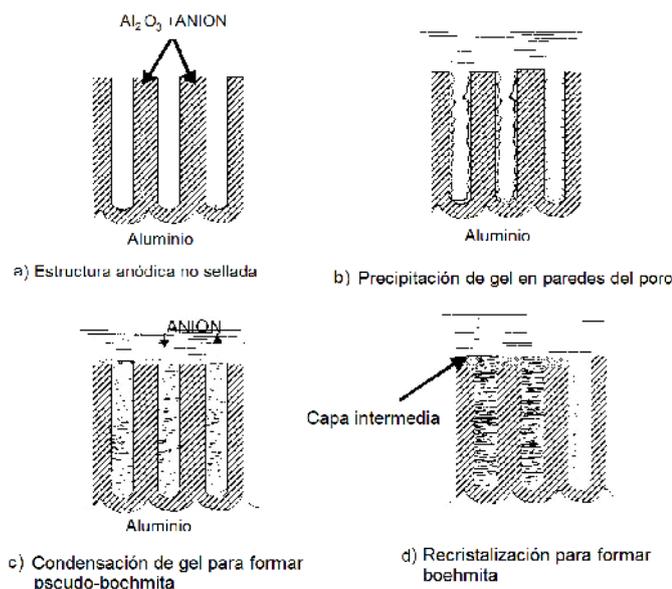


Fig. 1.9. Mecanismo de sellado de la capa anódica.

Es muy importante para asegurar un perfecto sellado de los poros, efectuar un control riguroso de la temperatura y pH del agua, así como evitar contaminaciones de iones, como fosfatos, fluoruros, cloruros y otros, los que pueden perjudicar la capa anódica y por lo tanto la calidad del acabado frente a ambientes agresivos.

Se han aplicado procesos de sellado en agua con adición de sales de níquel o cobalto que aceleran el proceso de sellado, incluso pudiendo aplicar temperaturas algo mas bajas debido a que favorecen el proceso de hidratación de los poros.

- ii) El proceso de sellado con vapor es una variedad del proceso de sellado por hidratación, ya que el mecanismo es el mismo

Presenta las siguientes ventajas frente al agua hirviendo:

- i) La hidratación es más rápida
- ii) Se necesita menos control, al no haber problemas de arrastres que puedan bajar el pH o contaminar el agua.

Sobre ambos tipos de sellado existe el fenómeno conocido como polvo de sello, que consiste en formación de un polvo fino sobre la superficie de la capa anódica como consecuencia de la reacción en la formación de cristales de boehmita.

### **COLORACIÓN DE LA CAPA ANÓDICA**

Después de un proceso de anodizado convencional la capa anódica de estructura porosa es fuertemente absorbente, siendo una base ideal para la absorción de colorante, Fig. 1.10.

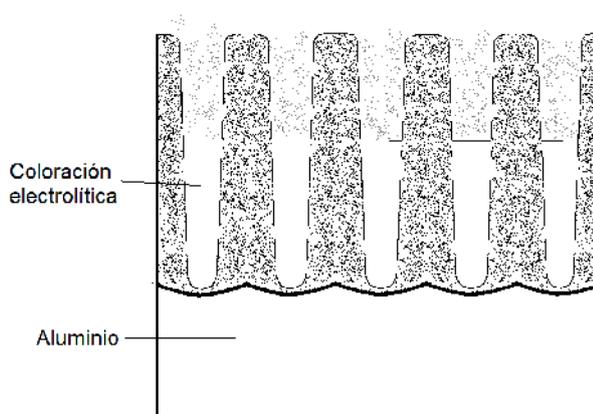


Fig. 1.10. Absorción del colorante por la capa anódica.

Las propiedades de absorción de colorante de las capas anódicas varían según las variables de los diferentes procesos electrolíticos. En la práctica es el anodizado por el proceso de ácido sulfúrico el que presenta las mejores propiedades para absorber colorantes. Anodizados basados en ácido crómico u oxálico pueden también ser coloreados en algún grado. No obstante el aspecto resulta más decorativo cuando se efectúa la absorción sobre capas anódicas transparentes como son la producida por el ácido sulfúrico.

Los principales factores que controlan la absorción de colorantes para capas anódicas son:

- i) Espesor de la capa anódica
- ii) El tamaño de los poros que absorberán moléculas del colorante.

Existen una gran variedad de colorantes capaces de ser absorbidos por capas anódicas pero la gran mayoría de ellos presentan poca estabilidad a la luz, por lo que el uso de este tipo de producto está restringido básicamente a piezas de aluminio que no han de ser expuestas continuamente al exterior.

Básicamente la coloración por absorción cubre una gama muy extensa de colores, pero para casos de aplicaciones muy particulares, como capas de anodizado duro o procesos de anodizado para uso en arquitectura, la coloración por absorción está muy restringida a unos pocos colorantes que presentan una mayor estabilidad. Así pues, se tiene que recurrir la mayoría de las veces a otros procesos de coloración que dan acabados decorativos agradables y, a su vez, resistentes en el tiempo de servicio.

Otro método de coloraciones es el electrolítico por inmersión en una solución de sales metálicas y pasando corriente alterna entre el aluminio anodizado, cátodo, y un ánodo de acero inoxidable o de carbono.

Este sistema de coloración es el más extendido en la actualidad para aplicaciones con fines decorativos en arquitectura, debido a las características de uniformidad y estabilidad al calor y a la luz. Esta estabilidad es debida a que la pigmentación se deposita en el fondo de los poros, encontrándose explicaciones diversas acerca de la naturaleza de los depósitos.

Se sabe que la deposición electrolítica a diferencia da la coloración por absorción empieza en el fondo de los poros y por estudios de microscopía electrónica se ha determinado presencia de óxidos metálicos y de partículas procedentes del electrólito de coloración en el interior de los poros.

Para la fijación de los colorantes es conveniente aplicar el proceso de sellado en una etapa posterior.

### **1.3 NORMAS DE CONTROL Y SEGURIDAD AMBIENTAL APLICADAS AL PROCESO**

Al desarrollar el proceso de anodizado y principalmente por las sustancias con las que se trabaja es importante conocer bajo que marco legal a nivel nacional e internacional se efectúa dicha actividad, así como también las leyes y normas que rigen los productos y desechos generados durante el proceso<sup>13,14 y 15</sup>.

Según la ley de medio ambiente de El Salvador, conforme al Art. 21, se requiere presentar un Estudio de Impacto Ambiental y de acuerdo a la misma, este tiene que ser sometido a la correspondiente Evaluación Ambiental, entendida como el proceso o conjunto de procedimientos, que permite al Estado, en base a un Estudio de Impacto Ambiental, evaluar los impactos ambientales que la ejecución de una determinada obra, actividad o proyecto puedan causar sobre el ambiente, así como asegurar la ejecución y seguimiento de las medidas

ambientales que puedan prevenir, eliminar, corregir, atender, compensar o potenciar, según sea el caso, dichos impactos ambientales.

Según el documento apegado a la ley de medio ambiente, el cual se refiere a la categorización de las actividades en el cual se encuentra dividido en dos grupos: El Grupo A, denominado “Actividades, obras o proyectos con impacto ambiental potencial bajo”, se deriva de que el titular de la actividad, obra o proyecto, no debe presentar documentación ambiental. El Grupo B, denominado “Actividades, obras o proyectos con impacto ambiental potencial leve, moderado o alto”, se deriva de que el titular de la actividad, obra o proyecto, debe presentar documentación ambiental. Este grupo se divide en dos categorías, la primera correspondiente a las actividades, obras o proyectos con impacto ambiental potencial leve y la segunda a las actividades, obras o proyectos con impacto ambiental potencial moderado o alto. El resultado de la evaluación ambiental que realiza el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) de la categoría 1, deriva la Resolución de que la actividad, obra o proyecto no requerirá de la elaboración de un Estudio de Impacto Ambiental. En la Fig. 1.11 se presenta un esquema de las dos categorías que define la ley y sus subdivisiones.

Al requerirse dicho estudio, es por que la actividad, obra o proyecto, según los Criterios Técnicos de Categorización se encuentra en la categoría 2 de este grupo. Es decir, que el titular de una actividad, obra o proyecto, de no requerir el Permiso Ambiental, no debe elaborar un Estudio de Impacto Ambiental, ni pasar por la Evaluación de Impacto Ambiental formal, establecido en la Ley del Medio Ambiente; caso contrario, debe elaborar el mencionado Estudio, lo que trae como consecuencia la aprobación o no del mismo.

Este documento servirá de consulta, referencia y orientación para el personal del (MARN), de las instituciones gubernamentales y municipales, titulares de

actividades, obras o proyectos y de prestadores de servicio de estudios ambientales y para todo aquel con interés en el tema.

La categorización se fundamenta en el Art. 22 de la Ley del Medio Ambiente en cuya parte final, expresa "... El Ministerio categorizará la actividad, obra o proyecto, de acuerdo a su envergadura y a la naturaleza del impacto potencial"; la que a su vez se basa en el listado de actividades, obras o proyectos que requieren presentar un Estudio de Impacto Ambiental de acuerdo al Art. 21 de dicho cuerpo legal. Es preciso señalar, que la envergadura de una actividad, obra o proyecto está referida al tamaño, volumen o extensión de la misma; y la naturaleza del impacto potencial se vincula a la sensibilidad del sitio o estado de conservación del ambiente en donde se pretende instalar y a su vez al tipo o naturaleza de la actividad, obra o proyecto a emprender.

Además se han considerado los artículos 18, 19, 20 y 24 literal b) de la Ley del Medio Ambiente, que literalmente dicen:

#### EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL

Art. 18.- Es un conjunto de acciones y procedimientos que aseguran que las actividades, obras o proyectos que tengan un impacto ambiental negativo en el ambiente o en la calidad de vida de la población, se sometan desde la fase de preinversión a los procedimientos que identifiquen y cuantifiquen dichos impactos y recomienden las medidas que los prevengan, atenúen, compensen o potencien, según sea el caso, seleccionando la alternativa que mejor garantice la protección del medio ambiente”.

#### COMPETENCIA DEL PERMISO AMBIENTAL

Art. 19.- Para el inicio y operación, de las actividades, obras o proyectos definidos en esta ley, deberán contar con un permiso ambiental. Corresponderá

al Ministerio emitir el permiso ambiental, previa aprobación del estudio de impacto ambiental”.

#### ALCANCE DE LOS PERMISOS AMBIENTALES

Art. 20.- El Permiso Ambiental obligará al titular de la actividad, obra o proyecto, a realizar todas las acciones de prevención, atenuación o compensación, establecidos en el Programa de Manejo Ambiental, como parte del Estudio de Impacto Ambiental, el cual será aprobado como condición para el otorgamiento del Permiso Ambiental.

La validez del Permiso Ambiental de ubicación y construcción será por el tiempo que dure la construcción de la obra física; una vez terminada la misma, incluyendo las obras o instalaciones de tratamiento y atenuación de impactos ambientales, se emitirá el Permiso Ambiental de Funcionamiento por el tiempo de su vida útil y etapa de abandono, sujeto al seguimiento y fiscalización del Ministerio.

#### EVALUACIÓN Y APROBACIÓN DE LOS ESTUDIOS DE IMPACTO AMBIENTAL

Art. 24 b).- La elaboración de los Estudios de Impacto Ambiental, su evaluación y aprobación, se sujetarán a lo siguiente:

b) En caso de aprobación del Estudio de Impacto Ambiental, el Ministerio emitirá el correspondiente Permiso Ambiental, en un plazo no mayor de diez días hábiles después de notificada la resolución correspondiente”.

Para efectos de este documento se define como Categorización al proceso técnico por medio del cual el MARN, determina si una actividad, obra o proyecto, requiere o no de la elaboración de un Estudio de Impacto Ambiental,

en función de la naturaleza de la actividad, su envergadura y a la naturaleza del impacto potencial a generar.

El alcance de la Categorización es establecer los criterios técnicos de cada una de las actividades, obras o proyectos, definidas en el listado del Art. 21 de la Ley del Medio Ambiente, los cuales deben ser objeto de un proceso sistemático de retroalimentación, lo que permitirá el ajuste de los criterios de categorización.

La categorización de actividades, obras o proyectos se fundamenta en los criterios siguientes:

- i) Envergadura, criterio asociado al tamaño, extensión, superficie, volumen o magnitud de una actividad, obra o proyecto, según corresponda.
- ii) Naturaleza del impacto potencial, referido a la sensibilidad del sitio o al estado de conservación de los factores ambientales: agua, suelo, aire, flora y fauna, del medio donde se pretende ejecutar una determinada actividad, obra o proyecto; es decir, es la capacidad del medio para asimilar o neutralizar los impactos potenciales a ser generados por las acciones humanas y del mayor o menor tiempo que éste requiere para su recuperación sin intervención exógena.
- iii) Naturaleza de la actividad, obra o proyecto, criterio que está relacionado al tipo de proceso a realizar y al riesgo potencial asociado a la misma. Cuando una misma actividad, obra o proyecto incluya dos o más de las establecidas en ésta categorización, la misma será determinada por aquella actividad que esté incluida en la categoría superior.

El proceso de anodizado que se realizara en este trabajo de graduación se enmarca en el grupo A, el cual según las leyes de medio ambiente se define como:

Grupo A: actividades, obras o proyectos con impacto ambiental potencial bajo, que no requieren la presentación de documentación ambiental.

En este Grupo se establecen aquellas actividades, obras o proyectos cuyos impactos ambientales potenciales a ser generados en los componentes del medio receptor (suelo, aire y agua) y a la salud de la población o bienestar humano, se prevé serán bajos, es decir, aquellos cuyos impactos potenciales en el medio, sean simples e inmediatos, por tanto “No Requieren presentar documentación Ambiental”.

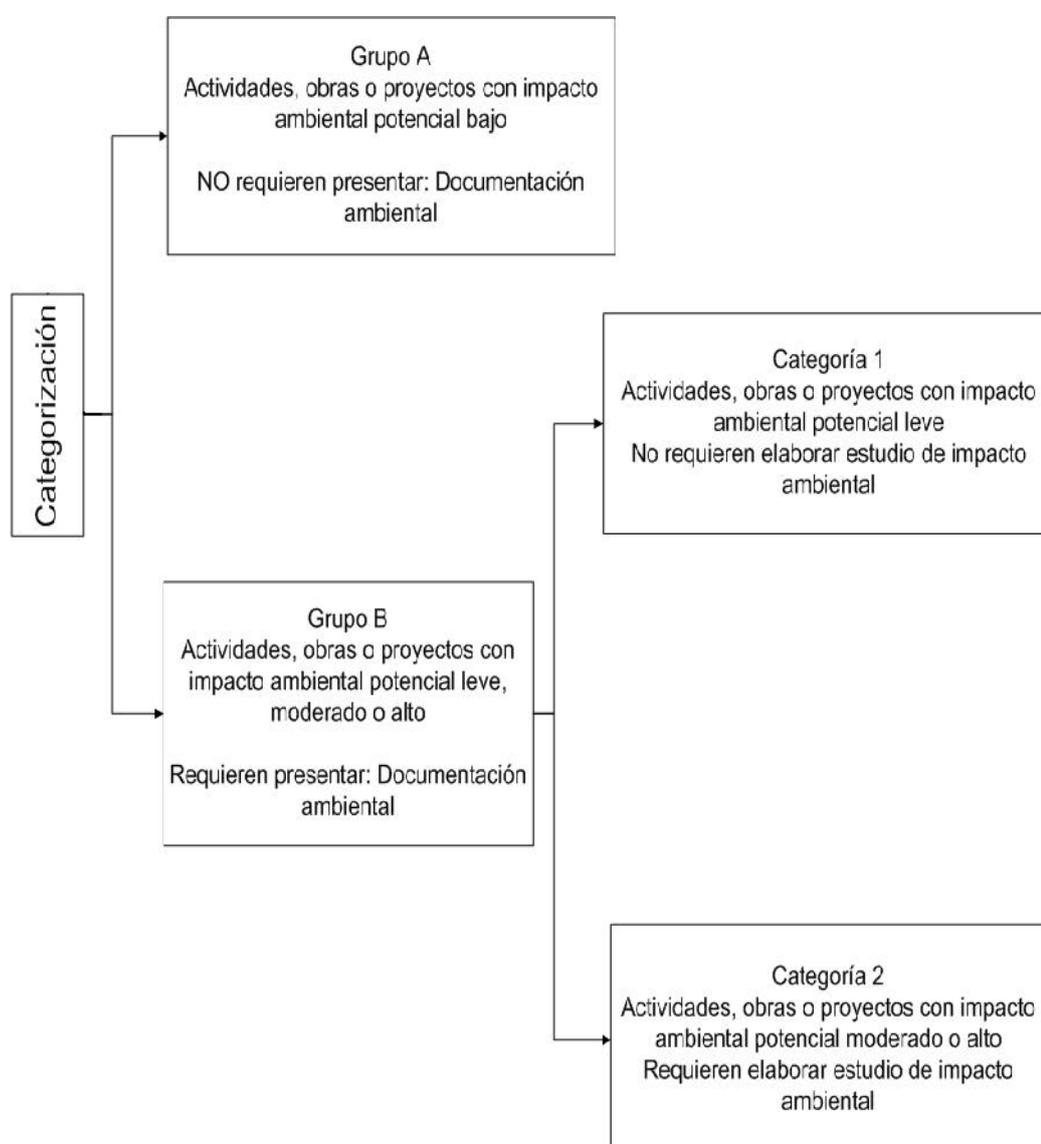


Fig. 1.11. Clasificación de actividades según la ley de medio ambiente.

Los impactos ambientales potenciales bajos, referidas en este Grupo, se fundamentan en los criterios siguientes:

Grupo A: Actividades, obras o proyectos de importación, transporte y almacenamiento de sustancias peligrosas y otras actividades con procesos peligrosos:

- i) Distribución de gas propano, con cantidades de almacenamiento menores a cincuenta (50) tanques de gas para uso doméstico.
- ii) Importación, transporte y almacenamiento de patrones primarios de reactivos de laboratorio, soluciones amortiguadoras (Buffer) o para medición de potencial de hidrógeno (pH), para calibración de aparatos y equipos de análisis fisicoquímico, incluyendo estándares con isótopos radioactivos de baja actividad, muestras de productos comerciales u otros en tamaño y cantidad tal que no represente riesgos al medio ambiente.
- iii) Importación, transporte y almacenamiento de muestras de uso no comercial, de productos terminados, que contengan sustancias peligrosas reguladas por el MARN
- iv) Importación, transporte y almacenamiento de productos terminados para limpieza de armas de fuego y municiones para armas de fuego, así como la venta y distribución de las mismas
- v) Importación, transporte y almacenamiento de medicamentos para consumo humano o veterinario
- vi) Importación, transporte y almacenamiento de sustancias empleadas como recubrimiento para tabletas (medicamentos) de consumo humano
- vii) Importación, transporte y almacenamiento de tóner y tintas a base de agua o solvente suave (que no contenga hidrocarburos aromáticos ni alifáticos), para impresora y similares
- viii) Importación y transporte de sustancias peligrosas cuyas cantidades sean menores o iguales a las establecidas como cantidad límite reguladas por el MARN, las cuales deberán ser transportadas bajo

condiciones adecuadas, cumpliendo los requisitos técnicos establecidos en la hoja de seguridad de las sustancias y los criterios de compatibilidad química entre ellas

- ix) Importación y transporte de productos terminados que contengan sustancias reguladas por el MARN, en cantidad tal que la sumatoria de las mismas no exceda del 20 % en peso del producto
- x) Importación, transporte y almacenamiento de equipos de incineración (hornos), aire acondicionado o de maquinaria conteniendo sustancias refrigerantes del tipo clorofluorocarbonos, filtros conteniendo carbón activado, extintores para incendio u otro equipo que requiera para su funcionamiento de las sustancias peligrosas en condiciones seguras y en cumplimiento de la normativa vigente
- xi) Sistemas para potabilización de agua, excepto los sistemas que empleen cloro gaseoso
- xii) Almacenamiento de sustancias peligrosas cuyas cantidades sean menores o iguales a las establecidas como cantidad límite reguladas por el MARN. En este caso, el número de sustancias almacenadas no deberá ser superior a cinco, y deberán ser almacenadas bajo condiciones adecuadas, cumpliendo los requisitos técnicos establecidos en la hoja de seguridad de las sustancias y los criterios de compatibilidad química entre ellas. Este máximo de sustancias en las cantidades límites establecidas, permiten un almacenamiento que no representa riesgos ambientales significativos

La Ley del Medio Ambiente define en el Art. 5, que una sustancia peligrosa es: “Todo material con características corrosivas, reactivas, radioactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o con actividad biológica”.

Estas características las presenta el ácido sulfúrico, aunque con las cantidades que se trabajará en el proceso, no es necesario la realización de un estudio de

impacto ambiental. Por lo contrario, para procesos industrializados de anodizado, se deberá contar con todos los permisos que la ley exige.

Las sustancias peligrosas están clasificadas en dos categorías, de acuerdo al efecto en el medio ambiente:

- i) Sustancias reguladas: sustancias peligrosas que para su importación y transporte no requieren elaborar estudio de impacto ambiental.
- ii) Sustancias que para su importación y transporte no requieren presentar documentación ambiental al MARN, pero requieren de permiso del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG).

El listado de las sustancias que el MARN reconoce como peligrosas son 540 sustancias de uso industrial y/o comercial, identificadas por nombre químico, el número de identificación de la sustancia del Chemical Abstract Service (CAS), el Número que la Organización de las Naciones Unidas (ONU) asigna como identificación de una sustancia peligrosa y la cantidad límite.

Según el documento del MARN, el ácido sulfúrico se encuentra en esta categoría, ácido utilizado a lo largo del proceso de anodizado.

#### **1.4 APLICACIONES DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIOS 6061 ANODIZADAS**

El aluminio y sus aleaciones tienen un amplio espectro de aplicaciones en diversas áreas de interés tecnológico debido a sus propiedades físicas y químicas. La gran utilización de estos materiales los ha situado a la cabeza de los metales no ferrosos en la industria aeroespacial, ya que con su baja densidad dispone de una elevada energía libre de formación del óxido de aluminio que junto con las características de refracción de la película formada

hace que se comporte como un metal noble. La película de óxido de aluminio generada es transparente, adhesiva y compacta.

Aunque el anodizado del aluminio en un medio ácido ha ayudado a la creación de una nueva generación de aluminios que presentan una mejora sustancial en sus propiedades mecánicas, pero una de las más importantes es el aumento en la resistencia al desgaste y el aumento en la dureza de los aluminios.

Las mejoras en las propiedades mecánicas producidas por el proceso de anodizado en los aluminios de la serie 6061, les permite la aplicación de éstos en procesos industriales dentro de los cuales se pueden mencionar:

- i) Moldes industria del calzado
- ii) Moldes de botellas de plástico por soplado
- iii) Moldes termoconformados
- iv) Moldes industria de caucho
- v) Moldes y matrices para la industria en general
- vi) Modelos para la fundición y placas
- vii) De uso general en la construcción de maquinaria industrial, armamento y blindaje
- viii) Automoción: Vehículos industriales
- ix) Plantillas.

Una de las principales aplicaciones del aluminio anodizado, que tiene una mención especial son los usos de estos procesos en la industria aeroespacial.

## **1.5 CONCEPTO DE DESGASTE Y FRICCIÓN**

Siempre que dos sólidos estén en contacto directo que ocasione fuerzas de acción y reacción en ellos, pueden decirse que dichos sólidos sufren una interacción en la superficie. Si la superficie de esos sólidos no es perfectamente lisa, el contacto entre sus superficies sólo ocurre en ciertos puntos aislados, de

ello se tiene la idea de un área aparente y un área real de contacto. En el área real de contacto el esfuerzo normal aplicado es alto y por tanto se formarán uniones o juntas, las cuales se romperán al iniciarse el movimiento, la fuerza necesaria para romper estas uniones es una medida de la fricción. A medida se rompen las uniones aparecerán residuos de desgaste entre ambas superficies. Para comprender el desgaste, es indispensable estudiar la topografía y la naturaleza de las superficies. El grado de deformación superficial y subsuperficial de los sólidos representa una parte fundamental en el mecanismo de fricción y desgaste, por lo que al analizar la naturaleza y cantidad de desgaste de dos superficies en contacto, se deben estudiar los esfuerzos de contacto y los tipos de movimiento<sup>16</sup>.

La historia de la ingeniería de la fricción es muy extensa. La primera aplicación práctica de la fricción fue el uso del calor friccional para producir fuego, lo cual tiene sus raíces en la prehistoria. La segunda aplicación de la fricción es el uso de trineos, rodillos o ruedas utilizando a menudo lubricantes líquidos con el propósito de minimizar el trabajo exigido al transportar objetos pesado, esto data desde hace más 3000 años.

El estudio científico de la fricción es, sin embargo, mucho más reciente que sus aplicaciones. De hecho el conocimiento de la fricción cinética y la fricción dinámica, se deben a la enunciación de la primera ley de Newton, la cual data del siglo XVII.

Entre los primeros investigadores de la fricción están Amontons [1699], Coulomb [1785], y Morin [1833]. Estos investigadores postularon que la fricción es debida al enclavamiento de las protuberancias mecánicas o asperezas en las superficies de los materiales en contacto, de esta manera se pudo explicar por qué la fuerza de fricción es proporcional a la carga e independiente del área de contacto. Esta explicación de la fricción fue llamada hipótesis de aspereza. Sin embargo, ellos también consideraron una explicación alternativa, sobre la

fricción, la cual establece que ésta es debido a fuerzas adhesivas entre las superficies en contacto. A esta última explicación de la fricción se le llamo hipótesis de adherencia, lo cual implica que la fricción es proporcional al área de contacto, lo cual es contrario a la evidencia experimental.

La hipótesis de aspereza fue la más aceptada en el siglo XIX y XX. En 1920 aproximadamente surge de nuevo el interés de estudiar la hipótesis de adherencia, gracias a los trabajos de Hardy [1919] y Tomlinson [1929]. Por este tiempo se desarrolló el estudio atómico de las superficies gracias al trabajo de Langmuir y colaboradores al inicio del siglo XX, examinaron las propiedades de fricción de superficies con diferentes grados de contaminación. Las grandes diferencias de fricción producidas al variar la contaminación parecían explicar más fácilmente la hipótesis de adherencia, en lugar de la hipótesis de aspereza; aunque, el problema todavía permanecía, ya que la hipótesis de adherencia sugiere que la fuerza de fricción es proporcional al área de contacto.

Estas dificultades fueron aclaradas por tres grupos diferentes de investigadores: Holm [1938] quién estaba estudiando las propiedades del contacto eléctrico en materiales; Ernst y Merchant [1940] investigaron el proceso de corte en metales; y Bowden y Tabor [1942] quiénes tenían conocimiento en el comportamiento interatómico de las superficies. Estos investigadores señalaron que había una diferencia crucial entre el área aparente y el área real de contacto, y que sólo el área real de contacto determinaba la magnitud de la fuerza de fricción. Puesto que el área real podría mostrar que es proporcional a la carga e independiente del área aparente, la hipótesis de adherencia puede ahora explicar los resultados experimentales, ya que la fuerza de fricción es independiente del área de la superficie aparente.

Desde ese tiempo, ha ido en aumento el interés en el proceso de la fricción y los estudios detallados de la manera como se produce la fuerza de fricción. El área real de contacto se compone de un número grande de regiones pequeñas

de contacto o uniones, muchos de los estudios teóricos y experimentales, se han llevado a cabo para examinar el tamaño, forma, esfuerzos, deformación y ciclo de vida de las uniones.

La historia sobre el desgaste puede estar presentada en forma muy resumida, aunque el proceso debió haberse observado primero durante muchos años, sin embargo su estudio sistemático es más reciente. A partir de 1940 se comenzó a estudiar el desgaste mientras éste sucedía, esto gracias al desarrollo de la era nuclear, en la cual se crearon dispositivos radiotrazadores con dicho propósito.

El proceso de desgaste es el deterioro sufrido por dos superficies en contacto a causa de la interacción de sus rugosidades superficiales esta interacción depende de la magnitud de la fuerza de presión que tiende a mantener en contacto ambas superficies.

Fricción es la resistencia al movimiento que se produce cuando dos objetos sólidos que se encuentran en contacto, son puestos en movimiento relativo uno con respecto del otro.

## **TIPOS DE DESGASTE**

El desgaste se puede clasificar de acuerdo a la naturaleza de las superficies en contacto, de la forma siguiente:

- i) Metal contra metal
- ii) Metal contra no metal
- iii) Metal contra fluido.

Sin embargo, dado que la naturaleza de las superficies en contacto puede cambiar súbitamente, y lo que era metal contra metal podría volverse metal contra no metal, o bien una lubricación que en un principio era adecuada podría fallar posteriormente; por esta razón la clasificación anterior pierde validez al

aplicarla en situaciones reales. Es por ello que se prefiere clasificar al desgaste aplicando la terminología de Burwell [1958] con la cual es posible establecer la causa primaria de cada forma de desgaste. Según Burwell [1958] los tipos principales de desgaste son: por adhesión, por abrasión, por erosión, por cavitación y por vibración.

El desgaste por adhesión ocurre cuando dos superficies se deslizan una sobre la otra o existe una presión que mantiene unidas a dichas superficies. La tendencia de dos superficies en contacto a adherirse proviene de fuerzas de atracción que existe entre los átomos de la superficie de ambos materiales. Si estas dos superficies en contacto son separadas posteriormente mediante la aplicación de una fuerza normal o tangencial, las fuerzas de atracción entre los átomos generan un esfuerzo que causa el desprendimiento de material de una superficie hacia la otra. El material desprendido tiene forma de partículas pequeñas que normalmente se transfieren a la otra superficie o se encuentran como partículas sueltas fuera de dicha superficie.

El desgaste por abrasión tiene lugar siempre que estén presentes partículas extrañas duras entre las superficies en contacto. Las partículas abrasivas se incrustan en una de las superficies y actúan como herramienta de corte, removiendo material de la otra superficie. Estas partículas pueden proceder del ambiente o como consecuencia del desgaste por adhesión y/o por un proceso de corrosión.

El desgaste por erosión es causado por un fluido a alta presión con partículas sólidas en suspensión las cuales al impactar sobre una superficie arrancan material de ella debido a los efectos de momentum de las partículas. La pérdida de material puede ser significativa, provocando roturas por fatiga. El grado de desgaste tiene relación con el ángulo de incidencia de la partícula con respecto a la superficie.

El desgaste por vibración se produce entre dos superficies que tienen movimiento oscilatorio relativo de pequeña amplitud, del cual se forman partículas abrasivas que originan cavidades en la superficie a medida que la oscilación continúa.

El desgaste por cavitación se origina en superficies entre las que existe fluido, el cual da origen a la formación de burbujas de vapor cuando éste llega a una presión menor que la presión de vapor. Estas burbujas son transportadas por el fluido hasta una región de mayor presión, donde el vapor regresa al estado líquido de forma súbita aplastándose bruscamente las burbujas. Si las burbujas de vapor se encuentran cerca o en contacto con una de las superficies cuando cambian de estado se producen presiones localizadas muy altas, ocasionando picaduras en dicha superficie.

### **MÉTODOS PARA DETERMINAR EL DESGASTE.**

La manera más común de determinar el desgaste consiste en examinar los materiales antes y después del deslizamiento, cualquier diferencia en los materiales se le atribuye al desgaste.

Entre los métodos más utilizados en la determinación del desgaste se tienen los siguientes:

- i) El método del peso consiste en pesar el componente a ser examinado, para ello dicho componente debe limpiarse cuidadosamente (generalmente se usan solventes como tricloroetileno o acetona), y luego se pesa
- ii) El método de medición mecánica utiliza un micrómetro que tiene una precisión de aproximadamente  $10^{-3}$  cm, el cual se utiliza para realizar las mediciones necesarias para el cálculo del área dejada por la espiga. Este método es usado cuando se estudia el desgaste en componentes de gran tamaño, tales como los cilindros de un motor de automóvil

- iii) El método óptico consiste en hacer una pequeña indentación con un microdurómetro en la superficie a estudiar, y luego observar la reducción del tamaño de la indentación durante el deslizamiento
- iv) Las técnicas de radiotrazadores son tan versátiles que es posible llevar a cabo varios experimentos. Con estas técnicas se puede estudiar la dinámica del proceso de desgaste por deslizamiento; así, si se desliza un espécimen radiactivo en una superficie no radioactiva de mayor dureza, éste formará una capa de residuos de desgaste radiactivos sobre la superficie, luego se reemplaza el espécimen radiactivo por uno no radiactivo y se reinicia el deslizamiento, al observar los residuos radiactivos con un radiotrazador, éstos son reemplazados rápidamente de la superficie no radioactiva.

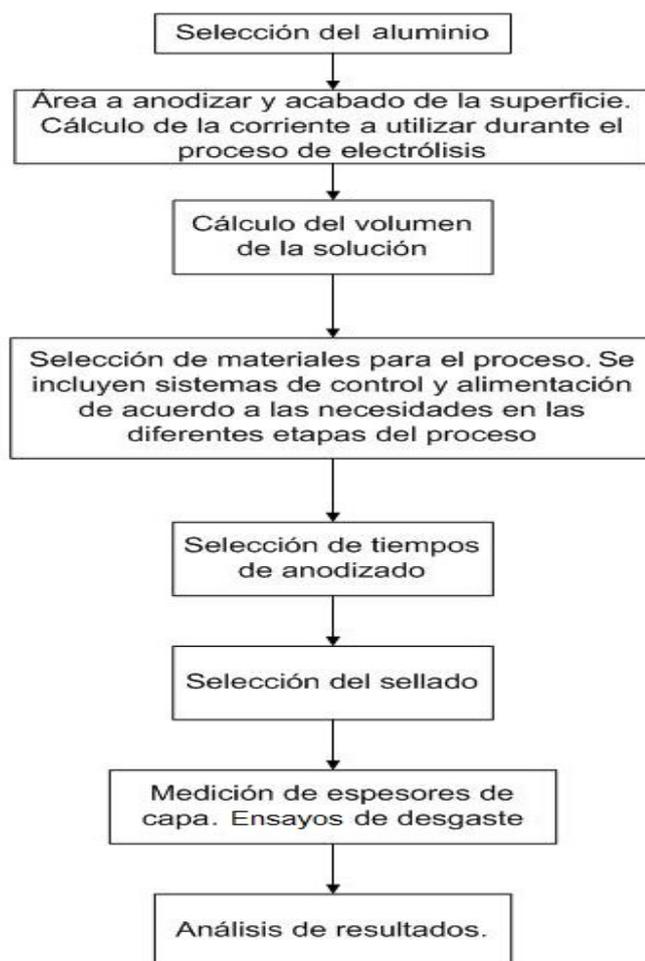
Finalmente, el presente trabajo de graduación ha sido conducido con la finalidad de estudiar el efecto de la capa anódica sobre la razón de desgaste de una aleación de aluminio 6061-T6. Para ello, se diseñará y construirá un sistema para la formación de la capa anódica.

## CAPÍTULO II

### 2 DISEÑO DEL SISTEMA PARA EL PROCESO DE ANODIZADO DE ALUMINIOS

En el diseño del proceso de anodizado se tomaron en cuenta algunos parámetros, tales como: corriente, voltaje, temperatura, área superficial de los especímenes y los tiempos de inmersión.

#### 2.1 FLUJOGRAMA DE LA METODOLOGÍA DEL DISEÑO DEL SISTEMA



## **2.2 SELECCIÓN DEL ALUMINIO**

Para la selección del aluminio, al cual se le aplicará el proceso de anodizado se tomaron en consideración los siguientes parámetros:

- i) Existencia en el mercado local
- ii) Aplicaciones del aluminio en la industria
- iii) Forma geométrica del aluminio, en el mercado
- iv) Precio
- v) Máquinabilidad.

De lo anterior se encontró en el mercado local la aleación de aluminio 6061-T6, el cual cumple con los parámetros de selección anteriormente descritos. Además, es una de las aleaciones más utilizadas en la industria local.

## **2.3 PROBETAS A ANODIZAR**

Las dimensiones de los especímenes de aluminio 6061-T6 a trabajar, han sido seleccionadas a partir de las presentaciones más comunes que se comercializa en el país y para sus aplicaciones más frecuentes. Las dimensiones son acorde con las dimensiones de la cámara de inmersión y de la fuente de voltaje con la que se dispone.

La aleación de aluminio 6061-T6 a utilizar, se encuentra en el mercado en barras cilíndricas de 6 m de longitud y de 27 mm de diámetro, a partir de estas dimensiones se construirán los especímenes, los cuales tendrán dimensiones de 25.4 mm de diámetro por 25.4 mm de altura (Fig. 2.1a). Los especímenes fueron maquinados de las dimensiones originales, a las necesarias, por medio de un cilindrado y refrentado, en un torno, luego en el mismo torno se pulió con lo cual se ayudó a mejorar las condiciones de las superficies de los mismos.

Los especímenes, además, serán taladradas con una broca de 6 mm, donde luego se realizará una rosca interna de 7 mm de diámetro, por medio de un machuelo, en el plano transversal (Fig. 2.1b). Este agujero roscado servirá para la fijación y manejo de las mismas durante la preparación previa al proceso electrolítico, durante el mismo y finalmente en el tratamiento final a la superficie.

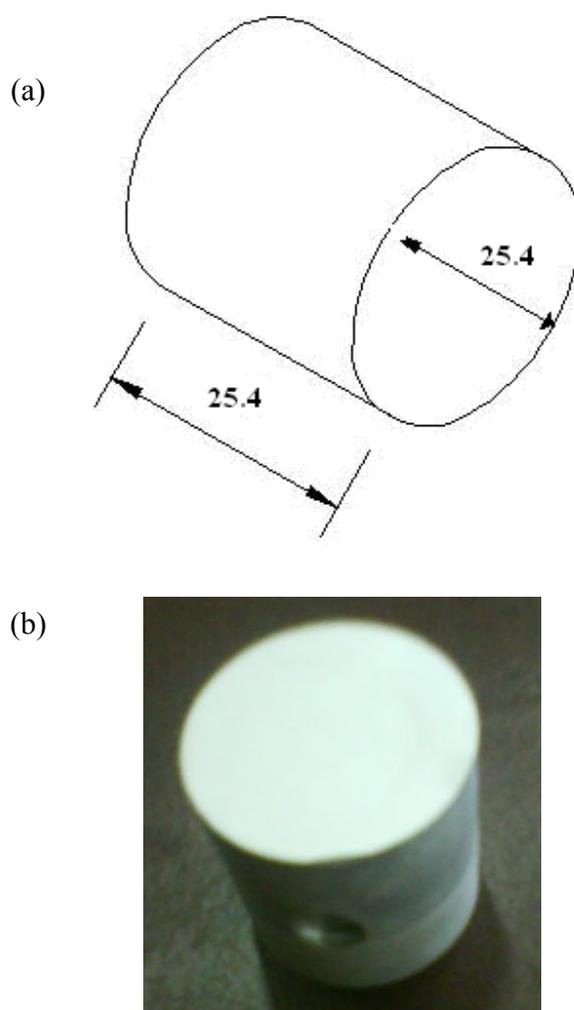


Fig. 2.1. Especímenes para el anodizado (a) Esquema  
(b) Fotografía.

## **2.4 DISEÑO DEL SISTEMA ELECTROLÍTICO**

En el diseño del proceso electrolítico es fundamental el mantener un flujo de corriente constante, así como también el contar con una mezcla de la solución acuosa de acuerdo con los porcentajes establecidos de ácido sulfúrico y agua destilada presentados anteriormente.

### **VARIABLES DE DISEÑO**

Los espesores de capa anódica que se obtienen del proceso de anodizado por electrólisis, dependen del porcentaje de concentración del ácido sulfúrico para el ambiente electrolítico, el voltaje y la corriente de la fuente utilizada y los tiempos de inmersión. Es necesario establecer estas variables y mantenerlas constantes para que los resultados del proceso de anodizado puedan ser reproducibles. Además, influyen en el proceso de anodizado, en una menor medida la rugosidad superficial de los especímenes a ser anodizados. Finalmente la rugosidad superficial solamente influye en la calidad del acabado de la capa.

#### **2.4.1 DIMENSIONES DE LA CÁMARA DE INMERSIÓN**

En general, se busca que la cámara de inmersión tenga un volumen acorde a las piezas que se van a sumergir. Las dimensiones de la cámara que se utilizará podrá retener una cantidad de volumen un poco mayor a la de la solución que se utilizará en el proceso. El flujo de corriente durante el proceso electrolítico está determinado no por la cantidad de solución utilizada sino por el porcentaje de ácido sulfúrico dentro de la solución y del área superficial a anodizar. Para el caso se utilizara un recipiente plástico (Fig. 2.2) de dimensiones de 30 x 15 x 15 cm.

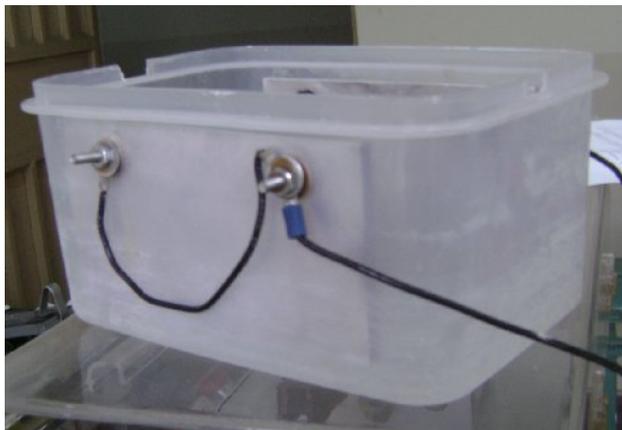


Fig. 2.2. Cámara de inmersión para anodizar con ácido sulfúrico.

## **SELECCIÓN DE MATERIALES**

Para llevar a cabo este proceso se requieren los siguientes elementos básicos:

- i) Recipientes plásticos
- ii) Sujeción de los especímenes
- iii) Cables para la transmisión de la corriente
- iv) Sistemas de control de temperatura
- v) Sistemas de fijación.

Estos deben ser seleccionados de acuerdo a las necesidades y ambientes de trabajo, requiriendo para cada uno de ellos, condiciones diferentes de selección.

## **SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS**

### **SELECCIÓN DE RECIPIENTES PLÁSTICOS**

Los polímeros abarcan materiales tan diversos como los plásticos, el hule y caucho. Estos son cadenas de moléculas orgánicas gigantes con masa

moleculares desde 10,000 hasta más de 1, 000,000 g/mol. La polimerización es el proceso mediante el cual moléculas pequeñas llamadas monómeras se unen con otras para crear moléculas gigantes o macromoléculas. Los polímeros se utilizan en una cantidad sorprendente de aplicaciones, incluyendo juguetes, aparatos domésticos, elementos estructurales y decorativos, recubrimientos, pinturas, llantas de automóvil, espumas y empaques.

Los recipientes deberán ser capaces de contener una solución de ácido sulfúrico necesaria para mantener los elementos completamente sumergidos en las diferentes etapas. Estos también, deben poseer propiedades de resistencia a la corrosión y soportar altas temperaturas en las diferentes sustancias a utilizar en el proceso. Durante el anodizado, los recipientes deberán ser capaces de soportar el ácido sulfúrico el cual puede llegar a alcanzar una temperatura máxima de 80 °C durante la electrólisis. En base a lo anterior, se pueden utilizar los polímeros que se presentan a continuación por sus respectivas características:

Los polímeros comerciales o estándar son materiales ligeros y resistentes a la corrosión, de baja resistencia y rigidez, y no son adecuados para usos a temperaturas altas. Sin embargo, son relativamente económicos y fácilmente conformados a una diversidad de formas, desde bolsa de plástico, engranes hasta tinas de baño.

Los polímeros ingenieriles están diseñados para dar una mejor resistencia o mejor rendimiento a temperaturas elevadas. Estos se producen en cantidades relativamente pequeñas y son costosos. Algunos de los polímeros ingenieriles pueden funcionar a temperaturas tan altas como 350 °C; otros, usualmente en forma de fibras, tienen resistencia térmica superior a las del acero.

De las dos opciones antes mencionadas que cumplen los requerimientos para la realización del procesos de anodizado, se utilizaron los polímeros

comerciales conocidos como "*Taperware*", por ser de fácil acceso, por precio y por la variedad que se pueden encontrar en el mercado local.

## **SUJECIÓN DE LOS ESPECÍMENES**

Para la sujeción de los especímenes, se utilizarán barras con dimensiones de 7 mm de diámetro y 100 mm de longitud, con ambos extremos roscados, dichas barras deberán ser de un material que presente características como buen conductor de energía eléctrica y además, que sean resistente a la corrosión producida por la electrólisis durante el proceso de anodizado y resistente a la corrosión producida por el proceso de decapado realizado con soda cáustica.

Deberán presentar una buena maquinabilidad, debido a que la sujeción de los elementos se realiza a través de barras de 7 mm de diámetro, con roscas externas en los extremos, las cuales se realizarán por medio de terrajas, para facilitar la sujeción de las piezas y la regulación de la profundidad de inmersión.

Dentro de los materiales que cumplen estas características se tienen, los aluminios de la serie 1xxx, el titanio, el acero inoxidable y el plomo. De los materiales antes mencionado se selecciono el aluminio de la serie 1xxx, por presentar mejores características y su accesibilidad en el mercado local.

## **CABLES PARA LA TRANSMISIÓN DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA**

Los cables para la transmisión de la corriente eléctrica durante el proceso de anodizado deberán soportar la corrosión causada por los vapores emanados del proceso electrolítico y deberán estar recubiertos de un aislante para estar protegidos contra la corrosión, además de cumplir su función de transmitir la corriente eléctrica de una manera óptima. Para lo cual, se utilizará un cable THHN #14, el cual presenta las características como: conductor de cobre el cual se muestra en la Fig. 2.3, posee un trenzado concéntrico comprimido Unilay (un

sólo sentido), aislamiento con PVC y sobrecapa de nylon, con excelentes propiedades de aislamiento térmicas y eléctricas con gran resistencia a la llama, a la humedad y a los agentes químicos, terminales aisladas para una mejor transmisión de la corriente eléctrica.

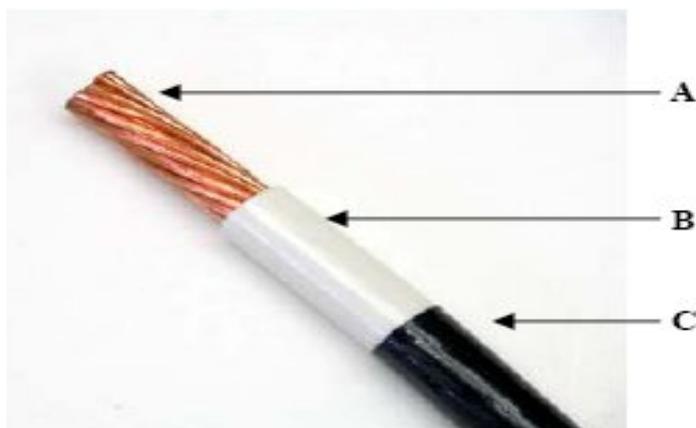


Fig. 2.3. Cable THHN #14. (A) Alambre de cobre recocido, (B) Aislamiento PVC y (C) sobrecapa de nylon como aislante.

## SISTEMAS DE CONTROL DE TEMPERATURA

Durante las diferentes etapas del proceso, se deberá controlar la temperatura. Los mecanismos de control serán mediante termómetros, los cuales deberán soportar la acidez de los químicos utilizados. Dentro de los termómetros que cumplen de manera efectiva las necesidades de medición durante el proceso se tienen:

El medidor de temperatura digital con haz infrarrojo (Fig. 2.4), debe tener las siguientes características:

- i) Fácil operación y manejo
- ii) Proporcionar lecturas precisas y rápidas a distancia considerable
- iii) Visualizar el objetivo con gran precisión
- iv) Poder utilizarse en condiciones adversas.



Fig. 2.4. Medidor de temperatura digital con haz infrarrojo.

El medidor de temperatura digital de contacto (Fig. 2.5), deberá:

- i) Ser de fácil operación
- ii) Ser capaz de proporcionar lecturas precisas y rápidas
- iii) Poseer una punta de acero inoxidable u otro material que resista la corrosión producida por la solución de ácido, utilizada en las diferentes etapas del proceso
- iv) Poder utilizarse en condiciones adversas.



Fig. 2.5. Medidor de temperatura digital con punta de contacto.

El medidor de temperatura de barra análogo de contacto (Fig.2.6), deberá ser:

- i) De fácil manejo
- ii) Con una escala de temperatura graduada con un intervalo de -10 hasta 150 °C
- iii) De vidrio templado
- iv) Poder utilizarse en condiciones adversas.



Fig. 2.6. Medidor de temperatura análogo de contacto.

De los modelos antes mencionados, se utilizaron los termómetros de contactos, digital y análogo, ya que ambos cumplen con los requerimientos que demanda el proceso de electrólisis y decapado.

### **SISTEMAS DE FIJACIÓN**

Se utilizarán para la fijación del cátodo, pernos de 6 x 30 mm, con sus respectivas tuercas y arandelas, los cuales deberán soportar los vapores y la acidez del proceso de electrólisis. Estos podrían ser del mismo material de los soportes para los especímenes, pero para este caso se utilizarán de un material galvanizado, el cual responde de una manera adecuada a los requerimientos.

El sistema de fijación, se utilizará para fijar los cátodos a la cámara de inmersión, tal como se presenta en la Fig. 2.2, además la misma sujeción servirá como soporte para el cableado general necesario para la transmisión de la corriente eléctrica alrededor de la cámara de electrólisis.

#### **2.4.2 CÁLCULO DEL VOLTAJE A UTILIZAR Y SELECCIÓN DEL ELEMENTO GENERADOR Y DISPOSITIVOS DE CONTROL**

Para el cálculo de la corriente eléctrica necesaria para el proceso, influyen las dimensiones de los especímenes y el volumen de la solución de ácido sulfúrico a utilizar.

El área perimetral del espécimen es de  $0.405366 \text{ dm}^2$ . De la empresa Aluminios de El Salvador se obtuvo una relación de  $2.0 \text{ A/dm}^2$ . Por cada proceso se trabajan dos especímenes por lo cual el área perimetral total a anodizar ahora es de  $0.810732 \text{ dm}^2$ . Con la relación proporcionada se obtienen que se debe de trabajar con aproximadamente  $1.75 \text{ A}$ . A la corriente eléctrica se le aplica un factor de seguridad de  $1.5$  y se obtiene una corriente de  $2.65 \text{ A}$ .

De la información proporcionada por la empresa Aluminios de El Salvador, en base a la experimentación continua en el proceso se establece que por cada  $1 \text{ A}$  se utilizará un litro de solución, por lo tanto se utilizaran  $2.65$  litros de solución.

#### **SELECCIÓN DEL CONTROL DE CORRIENTE ELÉCTRICA**

El sistema de control de corriente eléctrica a seleccionar debe satisfacer las necesidades siguientes:

- i) Proporcionar una lectura de corriente eléctrica precisa y rápida
- ii) Poseer opciones de selección de valores máximos y mínimos

- iii) Poseer una cubierta plástica, la cual resista las emanaciones de gases del proceso electrolítico
- iv) Poseer anclaje
- v) Ser digital, fácil manejo
- vi) Poseer opciones de lecturas de corriente alterna y corriente directa.

Por lo anterior, una buena opción será seleccionar un multímetro (Fig. 2.7) con pinza amperimétrica y con salida a termocuplas



Fig. 2.7. Pinza amperimétrica con termocuplas.

## **SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN DE CORRIENTE ELÉCTRICA**

Para el ataque electrolítico, se necesita una fuente que satisfaga las necesidades siguientes:

- i) Deberá ser un rectificador de potencia
- ii) Sea ajustable a partir de 0-15 voltios de corriente directa

- iii) Ofrecer dos modos de operación: automático y manual
- iv) Mediciones en voltios
- v) Posee sus conectores aislado

Se cuenta con varios tipos de fuentes de potencia que satisfacen las necesidades anteriormente descritas, el modelo seleccionado para el proceso de electrólisis es VS-35, el cual se presenta en la Fig. 2.8, y es adecuado para pequeñas líneas de anodizado, menos de 10 galones de solución.



Fig. 2.8. Fuente de potencia y rectificador de corriente.

## 2.5 REACTIVOS QUÍMICOS A UTILIZAR EN EL SISTEMA

La solución a utilizar consiste en 80% agua destilada y 20% ácido sulfúrico, dicho porcentaje puede variar de acuerdo al tipo de anodizado que se desea obtener, tal como se citó en la teoría.

### 2.5.1 REACTIVOS DE LA SOLUCIÓN ACUOSA

El ácido sulfúrico,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (Fig. 2.9), a temperatura ambiente, es un líquido incoloro, inodoro de olor picante, muy corrosivo y de gran viscosidad. El ácido sulfúrico es el ácido mineral de uso más frecuente en la industria. Al mezclar ácido sulfúrico con agua se libera una considerable cantidad de calor. Una libra de ácido sulfúrico al 100% diluido a 90% libera 80 BTU de calor y diluido a 20% libera 300 BTU. Una solución con un porcentaje de ácido sulfúrico cercano al 100% corroe todo material orgánico como la piel y la carne, y a la vez, por sus propiedades corrosivas, puede causar ceguera si, se introduce en los ojos.

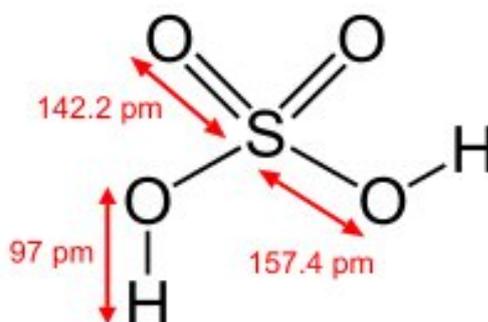


Fig. 2.9. Esquema molecular del ácido sulfúrico y espaciado molecular.

El ácido sulfúrico, uno de los llamados productos químicos pesados, es un líquido oleaginoso, fuertemente corrosivo, muy corrosivo y poco volátil. Tiene múltiples aplicaciones, tanto en la industria inorgánica como en la orgánica y constituye una materia prima o un reactivo en gran parte de estas industrias, dado su relativo bajo precio y versatilidad. Generalmente, se produce dentro de la propia industria que lo consume, por lo que su comercio no es tan fuerte como su consumo.

Su consumo por habitante da idea de la potencia de la industria química de una nación, del mismo modo que la del hierro, da idea de la potencia de la industria en general. Es utilizado en múltiples industrias, como por ejemplo:

- i) Fabricación de ácido clorhídrico
- ii) Fabricación de sulfato de amónico
- iii) Fabricación de productos fosfáticos
- iv) Refinado de petróleo
- v) Preparación de acumuladores
- vi) Fabricación de glucosa
- vii) Industria del curtido
- viii) Industria tintorera
- ix) Industria metalúrgica.

En el siglo XIII, ya se obtenía este ácido (conocido como aceite de vitriolo) por destilación del alumbre (vitriolo). Existen referencias de su fabricación mediante combustión del azufre en vasijas húmedas y en presencia de sal nitro (Basilio Valentino en el siglo XV). Su importancia se derivó del hecho de ser el primer ácido no natural obtenido y por ser el más fuerte y agresivo de todos.

Partiendo de los conceptos derivados de estos métodos empíricos, se desarrolló en Inglaterra en 1736, un proceso diseñado por Roebuck y conocido como método de las cámaras de plomo, que puede ser considerado como el primer método químico a escala industrial. El nombre derivaba de las grandes cámaras de plomo que eran utilizadas como reactores catalíticos homogéneos para realizar la oxidación del dióxido sulfúrico ( $\text{SO}_2$ ) a trióxido sulfúrico ( $\text{SO}_3$ ).

Pese a las sucesivas mejoras introducidas al proceso (recuperación de los óxidos de nitrógeno, aumento en la concentración del ácido producido, etc.), este método se ha visto sustituido por el llamado método de contacto (catálisis heterogénea), desarrollado a partir de una patente de Phillips del año 1831. Este método se basa en la oxidación catalítica del  $\text{SO}_2$ , sobre un catalizador

sólido, y posterior absorción del  $\text{SO}_3$  formado sobre ácido sulfúrico de una concentración del 97 – 99 %.

La invención de Phillips no alcanzó un éxito comercial sí no hasta unos 40 años más tarde, ya que:

- i) Existía carencia en la demanda de ácido sulfúrico monohidrato (ácido al 100 %) o de alta concentración (concentración superior al 94%)
- ii) Conocimiento inadecuado de la catálisis heterogénea
- iii) Carencia de recursos tecnológicos para realizar el proceso.

El desarrollo de la industria de los colorantes tuvo como consecuencia inmediata una gran demanda de ácido sulfúrico concentrado y por tanto introdujo la necesidad de sustituir, al menos parcialmente, el método de las cámaras de plomo por el método de contacto.

Posteriormente, las exigencias medioambientales de los años 60 y 70 del siglo XX, obligó a utilizar métodos con un menor impacto ambiental y por tanto conllevó a la desaparición de instalaciones que utilizaban el método de las cámaras y su sustitución total por otras que utilizan el método de la doble absorción (método de contacto con dos etapas de absorción), que hoy en día es el método utilizado y que deriva de una patente realizada por Bayer A.G. en los años sesenta.

En la actualidad todas las plantas de ácido sulfúrico que existen en el mundo lo fabrican por el método de contacto, ya sea de absorción simple o de doble absorción.

## **PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS**

Datos Físicos:

- i) Peso molecular: 98.08 g/mol
- ii) Punto de ebullición a presión de 760 mm de Hg: 270 °C (518 °F)

- iii) Peso específico (agua = 1 kg/m<sup>3</sup>): 1.84 kg/m<sup>3</sup>
- iv) Densidad relativa del vapor (aire = 1 en el punto de ebullición del ácido sulfúrico): 3.4
- v) Punto de fusión: 3 °C (37 °F)
- vi) Solubilidad en agua g/100 g de agua a 20 °C (68 °F): miscible en todas proporciones

**Reactividad:**

- i) Incompatibilidades: El contacto del ácido sulfúrico con materiales orgánicos (tales como cloratos, carburos, fulminatos y pie ratos) puede provocar incendios y explosiones. El contacto del ácido sulfúrico con metales puede crear emanaciones tóxicas de dióxido sulfuroso e hidrógeno gaseoso inflamable.
- ii) Productos peligrosos de la descomposición: Al descomponerse el ácido sulfúrico pueden desprenderse gases y vapores tóxicos como por ejemplo, emanaciones de ácido sulfúrico, dióxido sulfuroso y monóxido de carbono.
- iii) Precauciones especiales: El ácido sulfúrico ataca a algunas clases de plásticos, caucho y revestimientos.

**Propiedades químicas**

El ácido sulfúrico es un ácido fuerte, es decir, en disolución acuosa se disocian fácilmente los iones de hidrogeno ( $H^+$ ) y los iones del sulfato ( $SO_4^{2-}$ ) y puede cristalizar diversos hidratos, especialmente el ácido glacial monohidrato ( $H_2SO_4 \cdot H_2O$ ). Cada molécula produce dos iones  $H^+$ , o sea, que el ácido sulfúrico es dibásico. Sus disoluciones diluidas presentan todas las características de los ácidos: tienen sabor amargo, conducen la electricidad, neutralizan los álcalis y corroen los metales activos desprendiendo gas de hidrógeno. A partir del ácido sulfúrico se pueden preparar sales que contienen

el grupo sulfato  $\text{SO}_4$ , y sales ácidas que contienen el grupo hidrogeno-sulfato,  $\text{HSO}_4$ .

El ácido sulfúrico concentrado es un importante agente desecante. Actúa tan vigorosamente en este aspecto que extrae el agua, y por lo tanto carboniza, la madera, el algodón, el azúcar y el papel. Debido a estas propiedades desecantes, se usa para fabricar éter, nitroglicerina y tintes. Cuando se calienta, el ácido sulfúrico concentrado se comporta como un agente oxidante capaz de disolver metales tan poco reactivos como el cobre, el mercurio y el plomo, produciendo el sulfato del metal, dióxido de azufre y agua.

### **2.5.2 REACTIVOS UTILIZADOS EN EL PROCESO DE ANODIZADO Y PARA LA PREPARACIÓN DE PROBETAS**

Las probetas deberán pasar por un proceso de limpieza a base de soluciones acuosas de 5% ácido sulfúrico y 95% agua destilada, así como por un proceso de decapado en soda cáustica. La solución con respecto a la solución acuosa ácido-agua, presenta propiedades similares a las descritas anteriormente. La soda cáustica o hidróxido de sodio se caracteriza por ser una sustancia incolora e higroscópica que se vende en el comercio en forma de trozos, escamas, hojuelas, granos, barras o líquido. Se disuelve en agua con fuerte desprendimiento de calor y la solución acuosa se llama "lejía de sosa". Las características físicas y químicas de la soda cáustica se detallaran a continuación.

#### **PROPIEDADES QUÍMICAS**

- i) El hidróxido de sodio es un producto altamente higroscópico que atrapa la humedad del aire. Igualmente absorbe el bióxido de carbono.
- ii) Es una base fuerte, en que las soluciones acuosas, muy alcalinas, reaccionan violentamente con los ácidos.

- iii) Es una sustancia muy reactiva, que puede reaccionar violentamente con numerosos compuestos como: aldehído acético, acroleína, acrilonitrilo, anhídrido maleico.
- iv) Con el 1.2 dicloroetileno y con tricloroetileno, se forman monocloroacetileno y dicloroacetileno, compuestos que pueden explotar con facilidad.
- v) En presencia de agua, el hidróxido de sodio, reacciona con las nitro-parafinas, nitro-metano y otros nitro compuestos similares, formando sales, que una vez secas son explosivas (reaccionan a los impactos).
- vi) Ciertos metales, como el zinc, aluminio, estaño, cobre, plomo, bronce y latón, son atacados por las soluciones acuosas de hidróxido de sodio, con desprendimiento de hidrógeno, altamente inflamable.
- vii) Algunas clases de plásticos, cauchos y revestimientos, pueden ser atacados por el hidróxido de sodio.

### **PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS**

- i) Estado físico: Líquido viscoso
- ii) Peso molecular: 39.9971 g/mol
- iii) Color: blanquecino
- iv) Inodoro
- v) Temperatura de Ebullición: 145 °C (al 50% peso)
- vi) Temperatura de Fusión: 10 °C (al 50% peso)
- vii) Solubilidad en Agua: 100% soluble
- viii) Presión de Vapor: 6,3 mm de Hg (40° y 50% peso)
- ix) pH: entre 13-14
- x) Peso específico: a 25 °C → 1.53
- xi) Otras solubilidades: Metanol, etanol, glicerina
- xii) Insoluble en acetonas y éter.

## **OBTENCIÓN Y USOS**

Se obtiene tratando una solución de carbonato sódico con hidróxido cálcico o mediante electrólisis de sales sódicas en cubas de mercurio o de membrana. Se utiliza en la producción de rayón, algodón mercerizado, jabones, papel, explosivos y tintes. También, en la fabricación de numerosos productos químicos, en la refinación del petróleo, en la industria metalúrgica para decapado, etc.

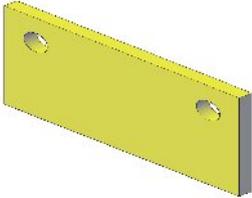
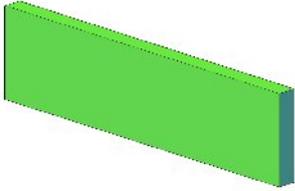
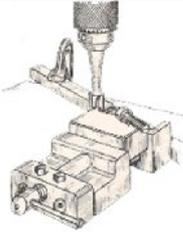
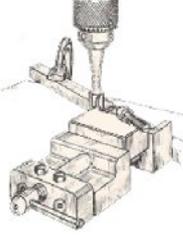
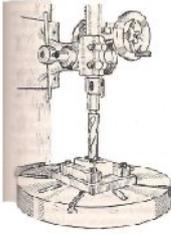
## **CAPÍTULO III**

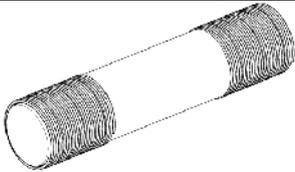
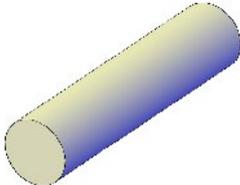
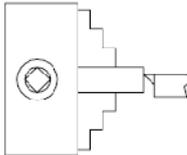
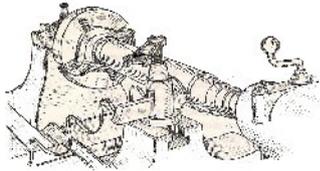
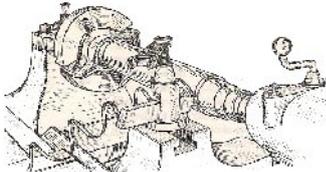
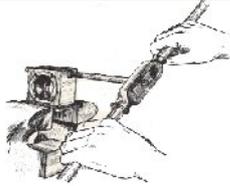
### **3. CONSTRUCCIÓN Y ENSAMBLE DEL SISTEMA**

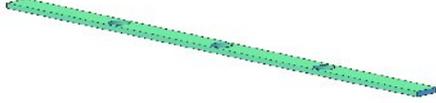
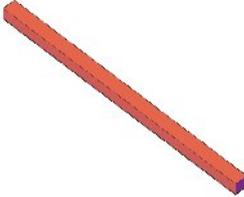
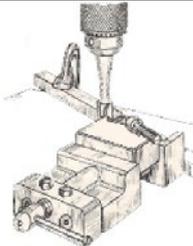
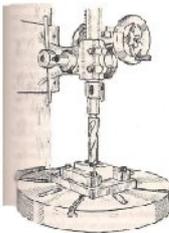
Antes de construir el sistema es necesario especificar el proceso de fabricación de cada uno de los elementos que lo componen, esto se hace utilizando hojas de proceso en las cuales se especifica el nombre del elemento, el material y se describe cada una de las operaciones que deben efectuarse hasta llevar al elemento a su acabado final. Una vez fabricados todos los elementos del sistema deben ensamblarse, tal como se presenta en un diagrama de ensamble.

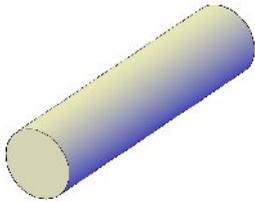
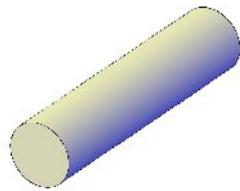
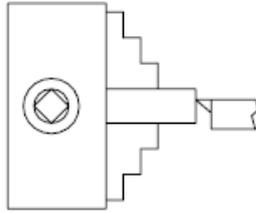
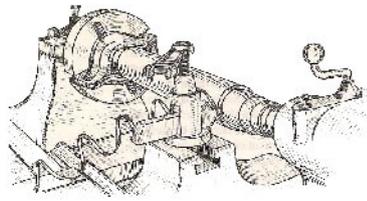
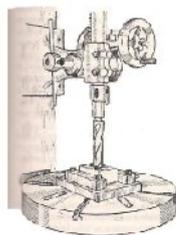
#### **3.1 CONSTRUCCIÓN DE LA CÁMARA DEL SISTEMA DE ELECTRÓLISIS**

A continuación se presenta el proceso de fabricación de cada uno de los elementos de la cámara del sistema de electrólisis. Este proceso inicia desde el material con dimensiones en bruto hasta llevarlas a las dimensiones requeridas. Las máquinas herramientas a utilizar para el proceso de fabricación son: torno, fresadora vertical y taladro de pedestal, entre otros. En las hojas de proceso se especifican las diferentes herramientas utilizadas en el proceso de fabricación.

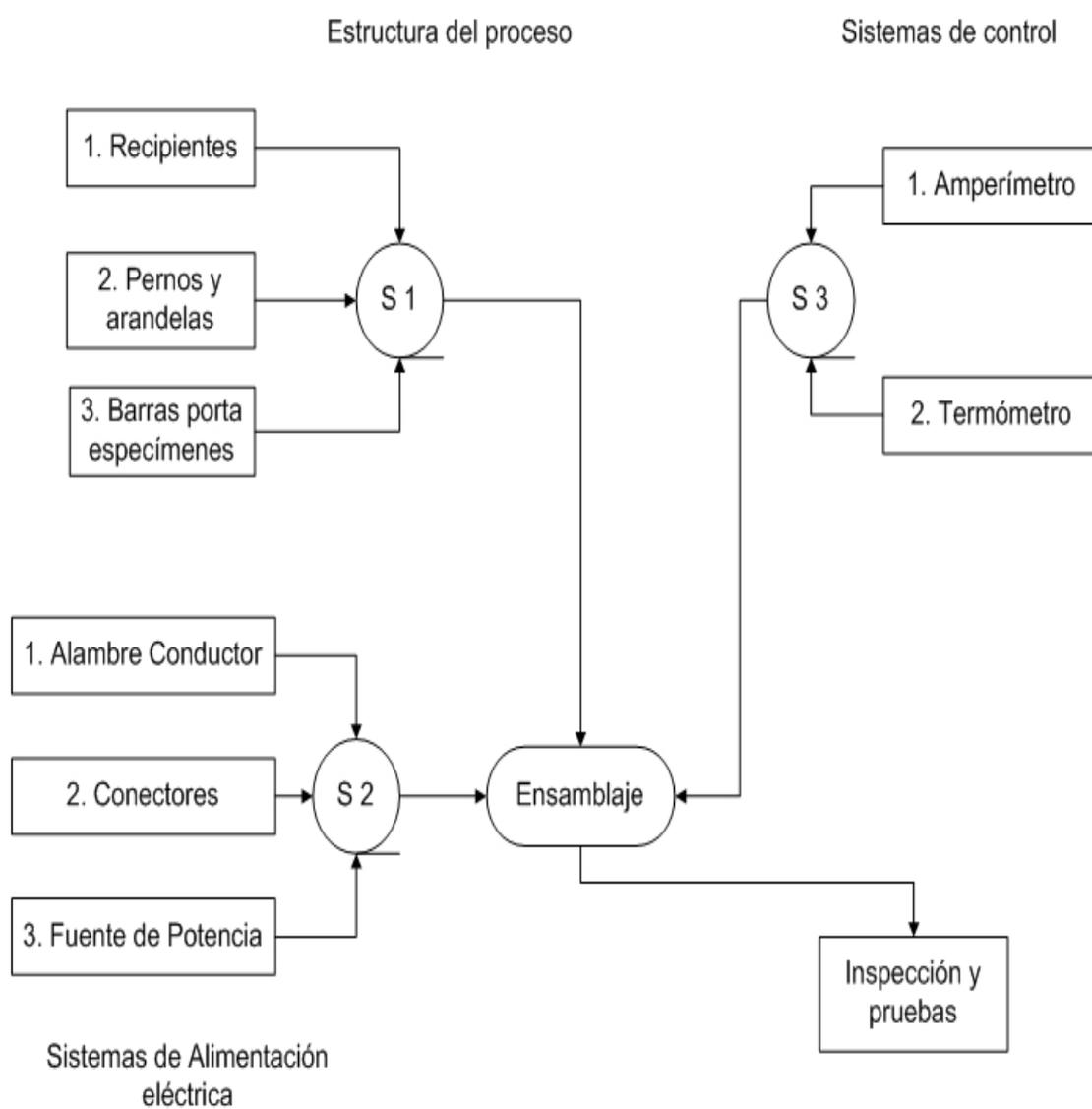
Hoja de proceso # 1				
Nombre: Cátodo			Material:	
Cantidad: 2			Aluminio 1 xxx	
Esquema del cátodo				
Nº	Operación	Cantidad	Esquema	Máquina y/o Herramienta
1	Trazado y corte de material de 150 x 80 x 8 mm, que actuará como cátodo	2		Prensa Regla Trazador Sierra Escuadra
2	Escuadrado y fresado de la pieza a 144 x 75 x 6mm	2		Fresado con herramienta cilíndrica helicoidal De 12.7 mm
3	Fresado			Fresado, con herramienta cilíndrica helicoidal de 12.7 mm
4	Taladrado a partir 15 mm de los extremos	2		Broca 7 mm.

Hoja de proceso # 2				
Nombre: Barras de sujeción de los especímenes				Material:
Cantidad: 3				Aluminio 1 xxx
Esquema de las barras				
Nº	Operación	Cantidad	Esquema	Máquina y/o Herramienta
1	Trazado y corte de material de 110 x 8.5 $\Phi$ mm	3		Prensa Regla Trazador Sierra y Escuadra
2	Refrentado de ambas caras 100 mm	3		Torno Butil para refrentado
3	Cilindrado a 7.5 $\Phi$ mm	3		Torno Butil para cilindrado Calibrador
4	Escalonar a 7 $\Phi$ mm	3		Torno Butil para exteriores Calibrador
5	Elaboración de rosca exterior	3		Terrajas de 7 mm.

Hoja de proceso # 3				
Nombre: Pletina para barras de sujeción				Material:
Cantidad: 3				Aluminio 1 xxx
Esquema de las pletinas				
Nº	Operación	Cantidad	Esquema	Máquina y/o Herramienta
1	Trazado y corte de material de 170 x 8 x 5 mm			Prensa Regla Trazador Sierra Escuadra
2	Escuadrado y fresado de material a 165 x 7 x 4 mm	1		Fresadora Fresa circular para desbasté
3	Taladrado de agujeros equidistantes entre si 60 mm	3		Taladro Broca de 10 mm Calibrador.

Hoja de proceso # 4				
Nombre: Especímenes			Material:	
Cantidad: 20			Aluminio 6061-T6	
Esquema de las barras				
Nº	Operación	Cantidad	Esquema	Máquina y/o Herramienta
1	Trazado y corte de material de 27 x 27 $\Phi$ mm	1		Prensa Regla Trazador Sierra y Escuadra
2	Refrentado de ambas caras a 25.4 mm			Torno Butil para refrentado
3	Cilindrado a 25.4 mm			Torno Butil para cilindrado Calibrador
4	Perforar y roscar			Taladro broca de 6 mm machuelos de 7 mm.

### 3.1 ENSAMBLE DEL SISTEMA DE ANODIZADO



## **CAPÍTULO IV**

### **4 MANUALES DE TRABAJO DEL SISTEMA**

En este capítulo se presentan las medidas necesarias para la manipulación, almacenamiento y trabajo de los reactivos químicos utilizados, durante el proceso de anodizado<sup>17</sup>.

Como se citó en la sección 2.4, se trabajará con ácido sulfúrico para el desengrase y soda cáustica para el decapado de los especímenes y con ácido sulfúrico, para la realización del proceso de electrólisis.

#### **4.1 NORMAS DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRATAMIENTO DE LOS REACTIVOS A UTILIZAR EN EL PROCESO**

Al trabajar con ácido sulfúrico se debe estar perfectamente informado sobre los riesgos que implica el manejo inadecuado del mismo, con el objetivo de tomar las precauciones necesarias, a fin de evitar derrames, fugas, inhalación de vapores y/o daños al equipo o a las instalaciones. Además, se debe estar bien instruido sobre los procedimientos en caso de que surja alguna emergencia y la mejor manera de proporcionar primeros auxilios en caso de entrar en contacto directo con el ácido o sus vapores.

#### **RIESGOS PARA LA SALUD**

La Interstate Commerce Commission, de los Estados Unidos de Norteamérica clasifica al ácido sulfúrico como un líquido corrosivo. Debido a sus propiedades corrosivas, oxidantes y de sulfonación, las soluciones de ácido sulfúrico, particularmente las más concentradas, deshidratan rápidamente los tejidos del

cuerpo, produciendo severas quemaduras. La constante exposición a bajas concentraciones puede producir dermatitis. En contacto con los ojos es particularmente peligroso; causa daños serios y, en algunos casos, la pérdida de la vista.

La inhalación del vapor concentrado de ácido sulfúrico caliente o de óleum puede ser muy peligrosa. La inhalación de pequeñas concentraciones de este vapor por un período de tiempo prolongado puede ocasionar inflamación crónica del tracto respiratorio superior.

La sensibilidad al vapor es variable: de 0.125 a 0.50 ppm, puede ser medianamente molesto, de 1.5 a 2.5 ppm, definitivamente desagradable y de 10 a 20 ppm, intolerable. La máxima concentración permitida en el ambiente para trabajar 8 horas diarias sin perjuicio para la salud es de 1 mg/m<sup>3</sup> de aire.

El ácido en si mismo, no es inflamable, pero se le debe aislar de materiales orgánicos, nitratos, carburos, cloratos y polvos metálicos. El contacto del ácido concentrado con estos materiales puede causar ignición. El ácido sulfúrico en tambores, carros-tanque y tanques de almacenamiento metálicos causa desprendimiento de hidrógeno. El gas hidrógeno es explosivo en el intervalo de 4 a 75% en volumen de hidrógeno en el aire.

Cuando se llega a ingerir ácido sulfúrico es muy peligroso y puede causar la muerte. Hasta la fecha, no se han descubierto otros efectos aparte de los antes mencionados.

## **CONTROL Y PREVENCIÓN DE ACCIDENTES**

El ácido sulfúrico no constituye un riesgo grave sí se instruye bien y además, se supervisan las labores relacionadas al manejo de esta sustancia. La instrucción

y la supervisión deberán tener como objetivo principal evitar riesgos de contacto del ácido con la piel, con los ojos o la inhalación de sus vapores.

## **CONTROL DE RIESGOS**

En las áreas donde se maneja o se almacena ácido sulfúrico deberán existir, distribuidas convenientemente regaderas de seguridad, fuentes de agua para lavado de ojos o red de tubería de agua potable para irrigación de los ojos y para lavar cualquier parte del cuerpo que haya podido ser salpicada. El agua que se emplea en la alimentación de estas regaderas y fuentes, deberá ser de preferencia tibia y las regaderas deberán suministrar agua en abundancia a una presión moderada habiendo una válvula de acción rápida y que una vez accionada quede abierta.

Todos los que laboren en áreas con ácido sulfúrico, deberán conocer la ubicación de los dispositivos de seguridad antes mencionados más cercanos a sus puestos de trabajo.

Para preparar soluciones de ácido sulfúrico con agua, debe tenerse la precaución de agregar lentamente y en pequeñas cantidades el ácido al agua y no al contrario, agitando muy suavemente la mezcla al mismo tiempo. Nunca deberá agregarse el agua al ácido, ya que de esta manera se genera una violenta elevación de temperatura que provoca la proyección del líquido, lo cual puede ocasionar salpicaduras de éste.

Es importante mantener una ventilación adecuada en todos los lugares en donde se maneja ácido sulfúrico, ya que los vapores son extremadamente irritantes a la parte superior de las vías respiratorias. El almacenamiento debe estar al descubierto, en edificios bien ventilados o en cobertizos. Los accesorios electrónicos deben ser del tipo a prueba de líquidos y todo el alumbrado debe estar dentro de conductos metálicos rígidos a prueba de líquidos.

## **INSTRUCCIÓN Y ENTRENAMIENTO**

La seguridad en el manejo de ácido sulfúrico depende, en gran parte, de la efectividad en la instrucción del personal, del entrenamiento correcto en las prácticas de seguridad, del uso del equipo de seguridad y de una supervisión inteligente. La supervisión es responsabilidad del personal después de la debida instrucción y el entrenamiento, de los encargados del manejo del laboratorio para que estos trabajen con seguridad y utilicen el equipo de protección personal que se les proporciona de la manera más efectiva.

Con objeto de estar informados sobre los riesgos a que se expondrían en caso de realizar maniobras inadecuadas, y para que, además, conozcan cómo actuar cuando se presente una emergencia, se deben impartir charlas sobre el manejo de ácido sulfúrico sobre los siguientes aspectos principales:

- i) Localización, propósito y uso del equipo de protección personal, regaderas de seguridad, garrafones de solución de bicarbonato de sodio e hidrantes en casos de emergencia relacionadas con el ácido sulfúrico.
- ii) Métodos para evitar la inhalación de vapores o vapor de ácido sulfúrico y contacto directo con el líquido.
- iii) Forma de actuar, procedimientos a seguir en casos de emergencia y medidas de primeros auxilios.
- iv) Precauciones y procedimientos a seguir durante la carga y descarga de ácido sulfúrico.

## **EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL**

Es necesario considerar como un complemento de carácter imprescindible y obligatorio el uso del equipo de protección personal a quien tenga contacto o esté implicado en el manejo directo del ácido sulfúrico, y no exime al operador de tomar cualquier tipo de medidas de precaución en cuanto a su comportamiento y desempeño personal en el ejercicio de cualquier operación.

El equipo de protección personal deberá seleccionarse, tomando en cuenta el trabajo que se va a desarrollar, entre los que a continuación se mencionan:

- i) Botas de hule
- ii) Guantes de hule
- iii) Mandil de hule
- iv) Chaqueta y pantalón de hule u otro material resistente al ácido
- v) Gafas de protección contra sustancias químicas
- vi) Pantallas faciales
- vii) Máscara con cartucho para vapores orgánicos y gases ácidos
- viii) Máscara o capuchón con suministro de aire forzado.

## **PROTECCIÓN PARA LOS OJOS**

Los anteojos de seguridad con bordes de metal o plástico con protecciones laterales sin perforaciones. Se pueden usar en los lugares donde es conveniente una protección continua a los ojos, tal como en los laboratorios. Sin embargo, no deben usarse donde se necesita una protección total de los ojos contra el ácido sulfúrico.

Las gafas tipo goggle de seguridad antiácidos, tipo ventosa o molde de hule, cuidadosamente ajustados y equipados con lentes de plástico o de vidrio resistente al impacto, deben usarse cuando haya posibilidad de contacto directo de los ojos con el ácido sulfúrico.

Las caretas de plástico (de cobertura total, como mínimo de 8 pulg), con protección para la frente, se pueden emplear como complemento de los goggles de seguridad antiácidos, en donde existe el peligro de impacto en los ojos desde abajo o alrededor de las partes laterales de la careta.

## PROTECCIÓN RESPIRATORIA

El equipo de aire autónomo permite al portador llevar una dotación de oxígeno o aire comprimido en un cilindro y el tipo autogenerador produce oxígeno químicamente. Los equipos anteriores permiten una movilidad considerable. El lapso de tiempo en el cual un equipo de aire autónomo da protección, varía de acuerdo a los volúmenes de aire, oxígeno material de regeneración que se transportan. No se debe usar oxígeno comprimido donde existe peligro de contacto con líquido o vapores inflamables o con fuentes de ignición, especialmente en espacios confinados como fosos o tanques.

Las mascarillas con manguera y con aire a presión suministrado por sopladores que no requieren lubricación interna, deben estar localizadas en un área libre de contaminación. Las condiciones de uso de este equipo deben ser tales que permitan el escape con seguridad en el caso de fallas del suministro de aire. Se deberá tomar precauciones para que la manguera no se enrede.

También, se pueden usar máscaras con aire de línea de planta, pero sólo si es posible el escape seguro, en caso de faltar aire. Se debe usar un regulador de presión adecuado, válvula de alivio y filtro de aire para efectuar la entrega de aire al área de trabajo a la presión óptima. Se debe revisar el aire con frecuencia.

Se pueden usar mascarillas para gas del tipo de filtro industrial, equipadas con protector facial que cubra toda la cara y dotadas del filtro correcto para la absorción del ácido sulfúrico. Estas mascarillas dan protección contra concentraciones que no excedan del 2% en volumen y el contenido de oxígeno del aire no sea mayor al 16% en volumen. Estas mascarillas deben usarse sólo durante períodos de exposición relativamente cortos. No son apropiadas para usarse en emergencias debido a que en esos momentos la concentración real del vapor es desconocida y puede haber una deficiencia de oxígeno.

En los lugares en donde se puede encontrar monóxido de carbono o algún otro gas con poco o ningún olor aparte de ácido sulfúrico, la mascarilla debe estar dotada de un filtro para todo uso.

### **PROTECCIÓN PARA LA CABEZA**

Debe usarse casco en los lugares donde existe peligro de impactos con objetos que puedan desprenderse y caer. Si no se considera necesario el uso de casco, se pueden emplear sombreros o gorras para dar protección contra fugas y salpicaduras de líquidos.

### **PROTECCIÓN PARA LOS PIES**

Se recomienda el uso de zapatos de seguridad de hule con casquillos internos de acero para el manejo de tambores y garrafones con ácido sulfúrico. Los zapatos de hule se sobreponen a los zapatos de seguridad de cuero. Deben limitarse totalmente cuando hayan sufrido contaminación en su uso.

### **PROTECCIÓN DEL CUERPO, DE LA PIEL Y DE LAS MANOS**

En los lugares en donde existe posibilidad de contacto con el cuerpo, se deben usar guantes de hule y mandiles. Se recomienda utilizar un equipo completo de hule con goggles contra químicos, botas de hule y máscara de plástico, para realizar limpieza de equipos.

### **RECOMENDACIONES PARA USO Y CONSERVACIÓN DEL EQUIPO**

Todo equipo de protección respiratorio debe ser proporcionado y de uso obligatorio durante el proceso electrolítico. Al usar equipo de protección respiratoria se deberá:

- i) Estar entrenado en su manejo

- ii) Identificarlo con su área de trabajo
- iii) Conocer el tiempo que le dará servicio.

Al conocer su equipo ya elegido deberá:

- i) Revisar las condiciones de éste
- ii) Reconocer sí el cartucho de carbón, está en buenas condiciones de uso o sí existe la necesidad de cambiarlo
- iii) Asegurarse que la careta facial no tenga el cristal roto y que ajuste bien a la cara
- iv) Probar que el tubo de respiración no tenga fugas y que las válvulas funcionen perfectamente
- v) Revisar las condiciones en que se encuentra el depósito de aire u oxígeno, así como asegurarse que éste se encuentre cargado, y de estarlo, revisar que la presión sea la necesaria para su uso al momento de requerirse
- vi) Verificar sí el compresor funciona adecuadamente y también cerciórese sí la atmósfera del área no esté contaminada.

Al revisar y probar el equipo deberá:

- i) Conocer en qué condiciones higiénicas se encuentra
- ii) De encontrarlo sucio deberá proceder a realizar el aseo requerido.

Al entregar su equipo de protección deberá:

- i) Reportar cualquier defecto que se haya encontrado en éste
- ii) Efectuar la limpieza general, con el objeto de que sea utilizado posteriormente sin pérdida de tiempo. Para su óptimo funcionamiento, se deberá tomar en cuenta estas medidas de seguridad: conservación y estado higiénico del equipo, a fin de evitar riesgos.

## ROTULACIÓN E IDENTIFICACIÓN

Todo recipiente que contenga ácido sulfúrico debe poseer en algún lugar visible una identificación que cumpla con las normas correspondientes del Ministerio de Medio Ambiente, por lo anterior, se identificará el contenido de este ácido en:

- i) Tanques de almacenamiento
- ii) Recipientes como botellas, garrafones y tambores.

### a) Tanques de almacenamiento

Los tanques de almacenamiento (Fig.4.1) deberán tener los siguientes letreros:



Fig. 4.1. Tanque T-1152 debidamente rotulado.

- i) Capacidad del tanque
- ii) Letrero que indique "ácido sulfúrico" u "óleum" y su concentración en porcentaje (Fig.4.2).
- iii) Identificación a la NFPA con el sistema de aplicación local 704 consistente en un diamante con los colores y números que se indican en la Fig. 4.3; el número 3 en el fondo azul indica que el  $H_2SO_4$  está clasificado como clase "3" en riesgo para la salud por su corrosividad. El cero en fondo rojo indica que por sí mismo el  $H_2SO_4$  no es flamable pero se debe recordar que al estar almacenado puede producirse desprendimiento de hidrógeno y éste sí es explosivo. El número 2 en fondo amarillo indica que el área de reactividad del ácido sulfúrico está clasificado en clase 2 debido a su forma violenta de reaccionar con el agua y precisamente en el diamante inferior blanco con el símbolo "W" indica que presenta reactividad con el agua (water).
- iv) Un rectángulo con fondo naranja con el número de identificación del ácido sulfúrico u óleum ante la Organización de las Naciones Unidas (ONU).
- v) Un letrero que indique:



Fig. 4.2. Tanque bajo norma T-1152 para ácido sulfúrico rotulado con porcentaje de concentración.

**PELIGRO:**

**NO SOLDAR, CORTAR O ENCENDER FUEGO SIN LA  
AUTORIZACIÓN CORRESPONDIENTE**

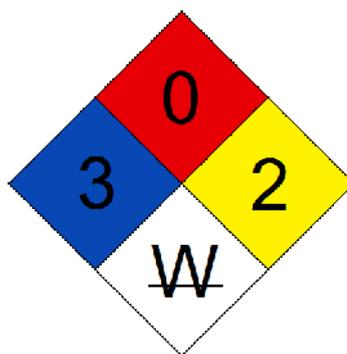


Fig. 4.3. Diamante de fuego explicado por la Norma NFPA 704 para materiales peligrosos. División azul; riesgo para la salud. División roja; peligro de inflamabilidad. División amarilla; riesgos por reactividad. División blanca; indicaciones especiales.

**MEDIDAS DE LOS LETREROS**

Las dimensiones de las señales deben ser de tal forma que el área (S) de la señal y la distancia máxima de observancia (L) esté de acuerdo a la fórmula:

$$S \geq \frac{L^2}{2000}$$

**RECIPIENTE COMO BOTELLAS, GARRAFONES Y TAMBORES**

Todo recipiente como botellas, garrafones, tambores, etc. que contengan ácido sulfúrico deberá contar con una etiqueta de seguridad durante su manejo, transporte y almacenamiento, con el objeto de identificar rápidamente mediante

una apreciación visual los peligros asociados con el ácido sulfúrico dentro del envase o embalaje. Estas etiquetas pueden ser adheribles o estar impresas en el envase o embalaje. Las etiquetas deben ser en idioma español e incluir la siguiente información:

- i) Nombre químico, nombre comercial y número de la ONU del ácido sulfúrico
- ii) El “diamante de fuego” que indica el riesgo asociado al ácido sulfúrico
- iii) Información general del ácido sulfúrico como: precauciones, primeros auxilios, indicaciones en caso de incendio y derrames; y el correcto manejo y almacenamiento del mismo.

Las especificaciones del rombo que contiene la etiqueta son:

- i) Debe ser de material resistente a la intemperie
- ii) Debe contener un cuadrado de dimensiones mínimas de 100 x 100 mm en forma de rombo, con una línea del mismo color del símbolo a 5 mm del borde exterior y paralela a éste. Esta figura es parte de la etiqueta, la cual puede variar de tamaño siempre y cuando se respeten las dimensiones mínimas del rombo
- iii) En la parte superior del rombo se coloca el símbolo internacional del ácido sulfúrico, en el vértice inferior el número de la clase de riesgo del ácido sulfúrico y en la parte media se coloca el nombre de la clase de riesgo del ácido sulfúrico o la división a la que pertenece. Las letras deben ser del tipo Franklin gótica condensada.

En caso de envases o embalajes pequeños, el tamaño de la etiqueta debe ser ajustado. Las dimensiones de la etiqueta varían de acuerdo al tamaño del recipiente (botella, garrafón o tambor).

## **PRECAUCIONES GENERALES CON RESPECTO A LOS RECIPIENTES**

Todos los recipientes retornables, una vez vacíos, deberán drenarse perfectamente colocándoles las tapas y tapones en su sitio, asegurándose de que cuenten con sus respectivos empaques. La parte inferior de los tambores o barriles retornables no deberá lavarse; solamente se lavarán las partes externas cuando estén salpicadas con ácido sulfúrico. Las etiquetas blancas que indicaban el contenido del recipiente, deberán destruirse, colocando en su lugar una etiqueta blanca de 15.24 cm (6 pulg) por lado, cuando menos, con la leyenda "vacío" impresa en letras negras, de por lo menos 2.54 mm (1 pulg) de altura.

## **PRIMEROS AUXILIOS**

En caso de que el ácido haya caído sobre la piel o los ojos se deberán lavar las partes afectadas haciendo uso de las regaderas de seguridad, fuentes lavaojos o garrafones que contienen solución de bicarbonato de sodio, y retirar al paciente del área contaminada. Se deberá llamar inmediatamente al médico, explicándole con exactitud lo sucedido.

## **CONTACTO CON LA PIEL Y MEMBRANAS MUCOSAS**

Las personas que hayan tenido contacto con el ácido sulfúrico deberán meterse a las regaderas de seguridad para lavar las partes afectadas con agua en abundancia, retirándoles la ropa lo más rápido posible. Como complemento de éste primer auxilio puede utilizarse jabón para lavar las partes afectadas. Las partes quemadas recibirán posteriormente un tratamiento médico similar al empleado en el tratamiento de quemaduras térmicas.

## **CONTACTO CON LOS OJOS**

Sí el ácido sulfúrico entra en contacto con los ojos, se les deberá irrigar de inmediato con agua en abundancia, por lo menos durante 15 minutos. Los párpados deberán mantenerse abiertos durante la irrigación, para asegurar el contacto del agua con los tejidos de la región. Luego se debe acudir o llamar inmediatamente al médico, de preferencia a un especialista. Sí después de la irrigación continúan las molestias, se necesitará una segunda irrigación de 15 minutos más y luego se podrán aplicar 2 o 3 gotas de un anestésico líquido protegiéndolos después con un parche. No aplicar aceites ni ungüentos oleosos.

## **INGESTIÓN**

Sí accidentalmente una persona llegará a ingerir ácido sulfúrico deberá tomar inmediatamente grandes cantidades de agua, con el objeto de reducir la concentración, y una vez hecho esto, puede tomar leche de magnesia o agua de cal para neutralizar el ácido. No debe provocarse el vómito ni hacer lavado de estomago. Deberá recibir atención médica inmediata.

## **INHALACIÓN**

Las personas que inhalen niebla de ácido deberán ser trasladadas a zonas no contaminadas; debe llamarse inmediatamente al médico, quién deberá mantener en observación al paciente durante un tiempo suficiente, por sí llegará a presentarse una reacción pulmonar. Sí se dispone de los medios necesarios, una persona capacitada o un médico, pueden suministrar oxígeno al paciente. La administración de oxígeno es más efectiva sí la respiración se hace contra una presión positiva de 6 cm de agua. Esto se puede lograr usando una manguera de hule conectada a la válvula de salida de una máscara facial y sumergida a una profundidad de no más de 6 cm debajo de la superficie del

agua en un recipiente adecuado. La presión de exhalación deberá ser ajustada de acuerdo con la tolerancia del paciente, variando la profundidad de la punta de la manguera debajo de la superficie del agua.

La inhalación del oxígeno deberá continuar el tiempo necesario para mantener el color normal de la piel de las membranas mucosas. En caso de exposición grave, el paciente deberá respirar oxígeno bajo presión positiva de exhalación por un período de media hora cada hora, durante por lo menos 3 horas; si el paciente no respira, deberá aplicarse un método artificial para reanudar la respiración. Cualquier droga o tratamiento de shock deberá ser administrado únicamente por el médico. Jamás debe intentarse administrar algo por la boca a un paciente inconsciente.

#### **4.2 MANUAL PARA LA LIMPIEZA Y PASIVACIÓN DE LAS PIEZAS A RECUBRIR CON EL SISTEMA**

Para la limpieza de las impurezas como se citó en la sección 2.4.2 se utilizará soda cáustica o hidróxido de sodio (NaOH) la cual es químicamente reactiva con una amplia variedad de productos orgánicos e inorgánicos. En todas sus formas, incluyendo la solución. La soda cáustica es altamente corrosiva y puede causar quemaduras graves en los ojos y la piel.

Debido a los peligros que se puede llegar a presentar al trabajar con soda cáustica es importante que todas las personas que la manipulen, directa o indirectamente, conozcan y sigan estrictos procedimientos de seguridad.

La solución de soda cáustica es un producto químico industrial muy corrosivo. Sí bien no parece ser peligrosa y tiene la apariencia del agua. La soda cáustica es inodora, por lo tanto, el olor no es una medida de advertencia. Además, la soda cáustica no causa dolor inmediato cuando entra en contacto con la piel, pero sí causa daño inmediato.

## **EFFECTOS SOBRE LA SALUD**

Al realizar un manejo adecuado del hidróxido de sodio se pueden llegar a evitar los riesgos para la salud descritos a continuación:

- i) Quemaduras graves las cuales pueden ser provocadas por soluciones de hidróxido de sodio con concentración mayor o igual al 5% y las mayores o iguales al 2% y menores al 5%
- ii) Quemaduras leves, e irritación en ojos y la piel, las cuales pueden ser provocadas por soluciones de hidróxido de sodio con concentración mayor o igual al 0.5% y menor al 2%
- iii) El hidróxido de sodio es una sustancia muy corrosiva y causa quemaduras severas en todos los tejidos con los que entra en contacto. Tanto las soluciones concentradas de este material como un estado sólido produce dolor inmediato por contacto con cualquier parte del cuerpo.

Su acción irritante obedece a que reacciona con las proteínas de los tejidos vivos con las que entran en contacto y produce su rompimiento por efectos de hidrólisis.

Las soluciones débiles de hidróxido de sodio no generan dolor por contacto con los tejidos sí no hasta después de varias horas de exposición sin haber retirada la solución del tejido en cuestión, pero aún las soluciones débiles son capaces de producir quemaduras sí no se retiran de la parte afectada.

Una exposición simple y corta de la que una persona se recupera satisfactoriamente no posee efectos retardados o a largo plazo sobre la persona. Luego de una exposición seria a grandes cantidades de esta sustancia sobre la piel se pueden producir daños tales que sea necesario efectuar procedimientos de transplante de piel. En algunos casos, sí el daño sobre la piel es muy severo, se puede producir la muerte de la persona afectada.

La exposición prolongada a nieblas de hidróxido de sodio puede generar daños permanentes en los pulmones. A nivel ocular puede producir ceguera permanente. Por ingestión de soluciones concentradas se generan daños a nivel de boca, garganta y esófago, donde puede ocasionar daños permanentes y dificultades para ingerir alimentos; sí la cantidad y concentración son lo suficientemente altas, puede provocar la muerte.

Al manejar esta sustancia se debe tener presente que al realizar diluciones en agua desde cualquier estado de concentración del hidróxido se produce generación de calor. Sí la solución de partida es muy concentrada o se parte de hidróxido de sodio anhidro, el calor generado puede dar lugar para iniciar la reacción de otras sustancias explosivas cercanas. Nunca se debe agregar agua al hidróxido de sodio sólido pues reacciona violentamente provocando salpicaduras cáusticas y una alta evolución de calor.

## **INHALACIÓN**

La inhalación puede darse por lo general en plantas industriales y de transformación química donde se trabaja con esta sustancia. Su presencia en el aire puede incluir nieblas, partículas sólidas de tamaño pequeño o aerosoles. El hidróxido de sodio, al igual que el ácido sulfúrico, es inodoro y por tal motivo su olor no brinda una medida de su peligrosidad en altas concentraciones.

Exposiciones moderadas cortas a hidróxido de sodio ( $< 2 \text{ mg/m}^3$ ) en forma de nieblas, polvo o aerosol generan irritación de las membranas mucosas de la nariz, garganta y tracto respiratorio. Por lo general trabajadores expuestos de manera prolongada a estos niveles de concentración desarrollan resistencia a los efectos que producen la irritación. Exposiciones agudas ( $> 3 \text{ mg/m}^3$ ) dan lugar a irritación inmediata del tracto respiratorio, produciendo hinchamiento o espasmos de laringe y generando posteriormente a obstrucción de las vías

respiratorias y asfixia. También, puede producir inflamación y acumulación de fluido en los pulmones.

Niños expuestos a niveles de hidróxido de sodio por periodos similares a los que están expuestos los adultos, presentan mayor riesgo por causa de su menor diámetro en las vías respiratorias y por lo tanto mayor posibilidad de llegar hasta cuadros de asfixia. También, a causa de su bajo tamaño son más propensos a entrar en contacto con nieblas, polvos o aerosoles de hidróxido de sodio que por lo general se acumulan en mayor concentración a bajas alturas, cercanas al piso. Personas que padecen de asma, son más susceptibles a la toxicidad inherente de esta sustancia.

### **CONTACTO PIEL / OJOS**

La exposición a soluciones de hidróxido de sodio en la piel es una forma común de entrar en contacto con esta sustancia. Tanto en el hogar como en la industria, pequeñas cantidades se usan como destapadores de cañerías y como limpiadores de estufas y hornos; así que el uso descuidado de este producto puede conducir a lesiones de grados diferentes. En el trabajo de laboratorio donde el hidróxido de sodio se usa como reactivo con diferentes fines existe una alta posibilidad de contacto a diferentes concentraciones de la solución.

El contacto de la piel con soluciones de hidróxido de sodio de concentraciones mayores al 25% en volumen provoca irritación inmediata, mientras que en el contacto con soluciones de concentraciones menores o iguales al 4%, la irritación no se presenta sí no hasta varias horas después sí la solución no se ha retirado de la piel o no se ha lavado la zona afectada. El contacto prolongado con hidróxido de sodio sólido o en concentraciones altas (>50%) por periodos de tiempo de alrededor de 3 minutos causa quemaduras muy severas y ulceraciones profundas en la piel. Para los niños se presenta mayor grado de

afectación a sustancias tóxicas de forma cutánea que para los adultos debido a la mayor relación de área de su piel en relación a su peso corporal.

En los ojos se generan irritaciones a casi cualquier nivel de concentración pero el grado de daño no se puede calcular con alguna certeza sí no hasta transcurridas unas 72 horas. La exposición en los ojos puede producir acumulación de fluido y coágulos de vasos sanguíneos de forma difusa o localizada. En la cornea puede producirse ablandamientos y ulceraciones, las que pueden seguir desarrollándose por varios días después del contacto. Los daños más severos, causados por la hidrólisis de las proteínas en los ojos, pueden producir ceguera, glaucoma u opacidad ocular (cataratas).

## **INGESTIÓN**

Esta es una vía poco común de contacto con soluciones de hidróxido de sodio pero se puede presentar deliberadamente en casos de intento de suicidio. De forma instantánea por la ingestión de hidróxido de sodio en concentraciones altas o en forma sólida provoca daños severos de tipo corrosivo en los labios, lengua, mucosa oral, esófago y estómago; pudiendo generar perforaciones, hemorragias u obstrucción del tracto gastrointestinal.

Puede producir vómito espontáneo, dolor en el pecho y en el abdomen, y dificultad para tragar. Las muertes reportadas por este tipo de exposición se dan a causa de shock, infección de los tejidos corroídos y daños en los pulmones. El grado de daño al tracto intestinal no está claro del todo sí no hasta después de varias horas de la ingestión.

## **EFECTOS CRÓNICOS**

La exposición prolongada a hidróxido de sodio en el aire puede provocar ulceración de las fosas nasales e irritación crónica de la piel, las secuelas de

una exposición prolongada incluyen voz ronca y síndrome de disfunción reactiva de las vías respiratorias, que es un tipo de asma generada por irritación.

## **EFFECTOS SISTÉMICOS**

No se encontraron estudios referidos a la presencia de efectos sistémicos por inhalación, ingestión o contacto con la piel de nieblas, soluciones o partículas de hidróxido de sodio.

## **INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA**

Hidróxido de Sodio Acuoso 50%

Esta sustancia no se ha clasificado como cancerígena para humanos en ninguna de las instituciones consultadas para este efecto, tales como: NIOSH, OSHA, EPA e IARC. También, no presenta efectos adversos mutagénicos o teratogénicos reportados. Se han reportado casos de cáncer en el esófago y en la piel luego de varios años de exposición a soluciones concentradas de Hidróxido de Sodio, pero la causa directa se asocia con la degeneración de los tejidos de localizados por las quemaduras cáusticas más que por la acción de la sustancia.

## **RESPUESTA A ACCIDENTES**

Toda persona que entre en contacto con un material químico peligroso no sólo debe estar atento a realizar medidas preventivas sí no también debe conocer acerca de procedimientos de emergencia, que pueden ayudar a evitar que un incidente menor se transforme en una catástrofe.

## **EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL**

Las personas deben estar provistas y obligadas a usar ropas impermeables, guantes, caretas, y otros materiales de protección apropiados necesarios para prevenir cualquier posibilidad de contacto con la piel de hidróxido de sodio sólido o de soluciones acuosas que contengan hidróxido de sodio.

Sí la ropa se contamina con hidróxido de sodio en forma sólida, se deberá realizar inmediatamente el cambio de las prendas antes de dejar el lugar de trabajo.

Al existir alguna posibilidad de exposición del cuerpo a soluciones de hidróxido de sodio líquido o sólido, deben proveerse instalaciones para el rápido lavado del cuerpo en el área o en un lugar aledaño con duchas, con agua abundante.

La ropa no impermeable que se contamine con hidróxido de sodio debe ser removida inmediatamente y no se debe usar hasta que el hidróxido de sodio sea removido por completo.

El personal que manipule hidróxido de sodio o soluciones de este tipo deben estar provistos y obligados a usar gafas de seguridad a prueba de salpicaduras donde exista alguna posibilidad que soluciones o nieblas de hidróxido de sodio entren en contacto con los ojos.

Al existir alguna posibilidad que soluciones de hidróxido de sodio entre en contacto con los ojos, debe proveerse una ducha lava ojos en las cercanías inmediatas al área de trabajo.

## **PROTECCIÓN RESPIRATORIA**

Se debe usar equipo de protección respiratoria (máscaras de respiración) cuando las prácticas de control de ingeniería y de operación no son

técnicamente alcanzables, cuando tales controles están en proceso de instalación o cuando fallan y necesitan ser reemplazados. Los equipos de respiración pueden ser también usados para operaciones donde se requiere ingresar en tanques o recipientes cerrados y en situaciones de emergencia. En adición al uso de respiradores y equipos de respiración, debe ser instituido un programa completo de seguridad respiratoria que debe incluir entrenamiento, mantenimiento, inspección, limpieza y evaluación.

### **PRIMEROS AUXILIOS**

Los casos de quemaduras de alguna seriedad requieren asistencia médica en centros hospitalarios. Las personas expuestas se deben retirar de la zona de peligro de la manera más rápida y segura posible sí el peligro es persistente. De lo contrario, los procedimientos de primeros auxilios deben primar. El proceso de descontaminación de las víctimas es crítico por la rapidez de acción de la sustancia. Por el carácter de la toxicidad del hidróxido de sodio no existen antídotos contra el. Este tratamiento consiste en soporte respiratorio y cardiovascular.

### **EXPOSICIÓN EN OJOS**

Para exposición en los ojos de soluciones de cualquier concentración de Hidróxido de Sodio, estos se deben lavar con agua en abundancia por lo menos durante 30 min. El lavado se debe realizar levantando ocasionalmente los párpados para retirar cualquier acumulación sobre estas superficies. Los lentes de contacto se deben retirar de los ojos sí este procedimiento puede llevarse a cabo sin generar traumas adicionales en los ojos. Sí no se retiran, el hidróxido de sodio atrapado en sus cavidades continuará provocando daños en los ojos. Sí la herida es severa, se debe continuar con los lavados oculares hasta que la víctima reciba atención médica.

## **EXPOSICIÓN EN LA PIEL**

La ropa contaminada con hidróxido de sodio debe ser retirada inmediatamente y las áreas expuestas de la piel deben ser lavadas con gran cantidad de agua durante por lo menos 15 min.

## **INHALACIÓN**

Cuando se inhalan nieblas o aerosoles de hidróxido de sodio, la víctima se debe retirar de la exposición de la forma más segura tanto para ella como para la persona que está prestando la asistencia. La víctima se debe ubicar en un lugar con aire fresco. Sí la víctima no está respirando o con muchos esfuerzo y en el lugar de la emergencia existen medios para la administración de oxígeno de un respirador, este procedimiento debe realizarse hasta la llegada del personal de atención especializado. En casos donde se tenga a la mano el inhalador de oxígeno, también puede administrarse el procedimiento de respiración artificial.

## **INGESTIÓN**

En caso de ingestión, no se debe intentar neutralizar los contenidos del estómago con sustancias o soluciones ácidas ni provocar vómito. El primer procedimiento es el enjuague de la boca con grandes cantidades de agua. Las víctimas que se encuentren conscientes y posibilitadas para la ingestión por vía oral deben tomar de 1 a 2 tazas de agua o leche para diluir la sustancia en el estómago. No se debe administrar nada por vía oral a víctimas inconscientes. Siempre se debe remitir a la víctima por atención médica.

La persona afectada por alguna o varias de las causas antes mencionadas se debe retirar de la zona de peligro. Para mejor desempeño en momentos de emergencia, deben aprenderse los procedimientos de emergencia de la

instalación y conocerse la ubicación del equipo antes que se presente la necesidad.

El personal que vaya a efectuar el rescate de víctimas en zonas con presencia de hidróxido de sodio en la atmósfera debe estar protegido con respiradores de presión positiva que cubran todo el rostro. Se recomienda el uso de guantes de caucho y ropa impermeable.

## **INCENDIOS**

Todos los tipos de agentes de extinción son aplicables al control de incendios de esta sustancia.

## **PROCEDIMIENTOS EN CASO DE DERRAMES O FUGAS**

Siempre que existan derrames de soluciones concentradas de Hidróxido de Sodio se den efectuar los siguientes pasos:

- i) Ventilar el área de derrame
- ii) Diluir con agua y neutralizar con Ácido Clorhídrico 6 molar

En casos en donde se derrame Hidróxido de Sodio sólido, éste se debe recoger barriendo sin adicionar agua directamente. Antes de tomar la decisión de disponer del material derramado como un residuo peligroso, se debe evaluar el grado de impurezas presente y las necesidades del proceso para considerar su reutilización. Aquellas personas que no porten el equipo de protección necesario deben ser retiradas de las áreas de derrame o fuga hasta que se hallan completado los procedimientos de descontaminación.

## **CONDICIONES PARA MANEJO Y ALMACENAMIENTO SEGURO ORIENTADAS A DISMINUIR EL RIESGO A LA SALUD HUMANA**

Antes de trabajar con hidróxido de sodio, los individuos deben ser entrenados en su manejo y almacenamiento. Además deben estar entrenados en el uso del equipo de protección personal. Debido a la posibilidad de generación de hidrógeno inflamable y combustible por el contacto del hidróxido de sodio con algunos metales, debe prohibirse fumar en zonas de almacenamiento, manejo o procesamiento de sustancias. En las mismas zonas, deben revisarse las líneas de conducción eléctrica para garantizar ausencia de cortos circuitos que puedan ocasionar chispas y posteriores explosiones e incendio si existe hidrógeno presente producto de la reacción del hidróxido con algunos metales con los que entra en contacto. Cuando se diluya el hidróxido de sodio, este debe ser siempre agregado al agua en cantidades reducidas.

Nunca usar agua caliente o agregar agua al hidróxido. El agua agregada al hidróxido de sodio puede causar ebullición incontrolada y salpicaduras violentas. Cuando se destapen contenedores con este material no usar herramientas que produzcan chispas debido a la posibilidad de existencia de hidrógeno gaseoso. Los contenedores de este material pueden ser peligrosos debido a que retienen residuos de producto.

### **ALMACENAMIENTO**

El empaque para esta sustancia debe ser de material irrompible. Los empaques que no sean irrompibles deben llevarse a un contenedor irrompible. El hidróxido de sodio no debe ser transportado junto con comidas o alimentos de ninguna índole.

En el almacenamiento, el hidróxido de sodio debe estar separado de ácidos fuertes, metales o alimentos. El área debe permanecer seca, con la menor

humedad posible y el piso debe ser de concreto resistente a la corrosión. Los contenedores de almacenamiento de hidróxido de sodio sólido deben estar cerrados herméticamente.

#### **4.3 MANUAL DEL TRATAMIENTO Y MANEJO DE DESECHOS QUÍMICOS DEL PROCESO**

Los desechos generados por el proceso de electrólisis para lograr el anodizado, son extremadamente contaminantes, por lo cual deben tratarse antes de poderse arrojar en los cursos de aguas, no así, los desechos utilizados en el decapado de los especímenes.

Siendo el ácido sulfúrico el más tóxico, se dedicará una buena parte de esta sección a la neutralización de éste. Varios son los puntos importantes, sin embargo, el pH de estos residuos es lo que más atentamente se debe controlar y se debe ver que dicho valor se encuentre en el intervalo de 6.0 a 9.0.

El principal método de tratamiento que se efectúa a estos efluentes es el de neutralización. Gehm describe su método de neutralización de desechos ácidos, que consta de una cama de piedra caliza, la cual trata a los desechos por encima 10.000 ppm. de acidez mineral en una cama capaz de recibir 0.1 mgd de desechos. Por otra parte también se encuentra el método de Shugart; un proceso que utiliza caliza para una neutralización automática, además, se investigaron los métodos de Spray-burning y Combustión indirecta.

A continuación se presenta una breve descripción de cada uno de los métodos antes mencionados, haciendo énfasis en la neutralización de los ácidos, los cuales son los utilizados para tratar los desechos del proceso de anodizado.

##### **SPRAY-BURNING**

Este método consiste en esparcir el desecho ácido en una cámara de combustión a alta temperatura (927-1,094 °C) con pequeñas cantidades de aire

en exceso con el fin de oxidar hidrocarburos. El sulfato se transforma en  $\text{SO}_2$  y los hidrocarburos en  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ ; los gases son enfriados y secados, y el  $\text{SO}_2$  es recuperable para su posterior uso en la fabricación de ácido sulfúrico nuevamente.

### **COMBUSTIÓN INDIRECTA**

La principal reacción de éste método, es la reducción de los excedentes de ácido sulfúrico en el sedimento fangoso por ciertos hidrocarburos que pueden hallarse presente o que se pueden adicionar.

### **PROCESO DE NEUTRALIZACIÓN**

Los tratamientos que se citaron anteriormente, son procesos de neutralización, y entre éstos se encuentran un alto número de métodos para eliminar el alto contenido de sobreacidez en los efluentes industriales; como por ejemplo:

- i) Mezcla de desechos de modo que el efecto en red de finalmente un pH neutro
- ii) Tratamientos mediante lechos de piedra caliza
- iii) Mezcla de desechos con trozos de piedra caliza o piedra dolomítica
- iv) El agregado de las correctas proporciones de soluciones concentradas de soda cáustica ( $\text{NaOH}$ ) o ceniza sodada ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) a los desechos ácidos.

Los materiales y los métodos deben ser seleccionados en base al costo total de la operación, ya que los costos del material varían ampliamente y los equipos que utilizan varios agentes pueden diferir con el método seleccionado. El volumen, tipo y la cantidad del desecho ácido a ser neutralizado son también factores al decidir qué agente de neutralización se empleará.

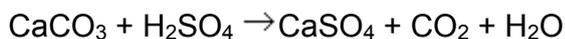
## MÉTODOS DE NEUTRALIZACIÓN

### MEZCLA DE DESECHOS BÁSICOS Y ÁCIDOS

La mezcla de efluentes puede ser llevada a cabo en una planta simple de operación. Desechos ácidos y básicos pueden ser producidos individualmente dentro de una planta y producirse la mezcla de los líquidos en un tiempo apropiado lo que permitirá llevar a cabo la neutralización, sin embargo esto requiere usualmente un depósito de cada efluente para abolir corrientes excesivas de uno u otro.

### TRATAMIENTO CON PIEDRA CALIZA

El pasar un efluente ácido a través de lechos de piedra caliza, fue uno de los métodos tradicionales para la neutralización. Los líquidos pueden ser pasados de arriba hacia abajo o viceversa, dependiendo de el origen del aparato y del costo inherente. Se logra escurrir 1 gpm/ ft<sup>2</sup> o menos. La neutralización procede químicamente acorde a la siguiente reacción:



La reacción continuará mientras dure la disponibilidad de la piedra caliza en la misma, y en estado activo. La primera condición puede encontrarse simplemente mediante la provisión de cantidad suficiente de caliza; la segunda condición es a veces más difícil de mantener. Sí se trabaja con una solución de ácido sulfúrico, debe ser diluida a un límite máximo de un 5 % y admisible hasta un intervalo de 5 gpm/ft<sup>2</sup> antes de que pase por el lecho. No se debe concentrar los esfuerzos en neutralizar el ácido sulfúrico arriba de un 0.3 % de concentración o a un intervalo menor a 1gpm/ft<sup>2</sup> debido a la baja solubilidad del sulfato de calcio. Un exceso de ácido va a precipitar el sulfato de calcio, causando subsecuentemente una capa que pasará la piedra caliza.

El uso del lecho de piedra caliza puede ser una seria desventaja para este método de neutralización, ya que la piedra caliza gastada debe ser reemplazada por nueva a intervalos periódicos, la frecuencia del reemplazo dependerá de la cantidad y calidad de los desechos ácidos que son pasados a través del lecho. Cuando se produce la existencia extrema de cargas de alta acidez, se puede producir espuma, especialmente cuando se encuentra presente material orgánico en el líquido.

### **TRATAMIENTO LIME-SLURRY**

Mezclar desechos ácidos con una mezcla acuosa de cal hidratada es un procedimiento efectivo de neutralización. La reacción es similar a la del método de lechos calizos. En este caso, sin embargo, la cal es utilizada constantemente porque es convertida en sulfato de calcio y eliminada con el efluente. Sí bien actúa lentamente, la cal posee un alto poder neutralizante y su acción puede ser acelerada por calentamiento u oxigenación de la mezcla. Es un proceso relativamente barato, pero a gran escala el valor puede pasar a ser un ítem importante.

La cal hidratada es a veces difícil de manejar, ya que tiene una tendencia a arquearse, o puentearse, sobre la salida del depósito y posee pobres propiedades de fluidez, pero es particularmente adaptable a los problemas de la neutralización envolviendo pequeñas cantidades de desecho, mientras éste puede ser depositado en embalajes con la ventaja de no tener que construir depósitos especiales.

En casos actuales, la neutralización del ácido sulfúrico en concentraciones por encima de un 1.5%, fue llevada a cabo satisfactoriamente por el uso de piedra dolomítica a muy alta temperatura que contiene 47.5% de óxido de calcio, 34.3% de óxido de magnesio y un 1.8% de carbonato de calcio. La concentración de ácido fue limitada hasta el estado de un 1.5%, debido a la ausencia de agua para diluir y así variar los porcentajes. Esta cal provee la

ventaja adicional de retener el sulfato residual hasta un mínimo, una imposibilidad con cualquiera de los métodos de lechos cálcicos.

### **TRATAMIENTO DE LA SODA CÁUSTICA**

El agregado de soluciones concentradas de hidróxido de sodio a los desechos ácidos como así también el agregado de carbonato de calcio en concentraciones apropiadas resultan rápidos aunque costosos procesos de neutralización. Pequeños volúmenes del agente son requeridos, ya que estos neutralizantes son mucho más poderosos que la caliza y la cal hidratada. Otra ventaja es que los productos de la reacción son solubles y no aumentan las durezas a las aguas que se reciben. Este método es apropiado para pequeños volúmenes, pero para neutralizar grandes volúmenes de desecho acuoso, se necesitan equipos especiales, de grandes dimensiones, como un depósito para el almacenamiento del neutralizante con una bomba de diversas velocidades para la directa adición del álcali a la corriente del desecho.

Se cito hasta ahora cuatro métodos para neutralización, de los cuales para la pasividad de los desechos generados por la electrólisis, se contaba con la opción de realizarla por medio de la soda cáustica generada por el decapado de las piezas y el método más sencillo, por medio de una solución acuosa de cal.

Luego de analizar los riesgos que conlleva cada uno de ellos, se procedió a la neutralización por medio de una solución acuosa de cal hidratada, debido a que la soda cáustica, contaba con residuos de aluminio los cuales reaccionarían con el ácido sulfúrico a tratar.

## **CAPÍTULO V**

### **5 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL Y RESULTADOS**

En este capítulo se pondrá a punto el proceso de anodizado, con el propósito de obtener los mayores espesores de capa anódica posible, sobre la aleación de aluminio 6061-T6. La medición de esta capa anódica se realizara por medio de un instrumento basado en las corrientes de Eddy, el cual puede obtener una medición mínima de 2  $\mu\text{m}$  y una máxima de hasta 60  $\mu\text{m}$ .

Los espesores de capa, obtenidos variarán en función del tiempo de inmersión en el proceso de electrólisis, y el acabado superficial obtenido será de acuerdo al inicial de los especímenes.

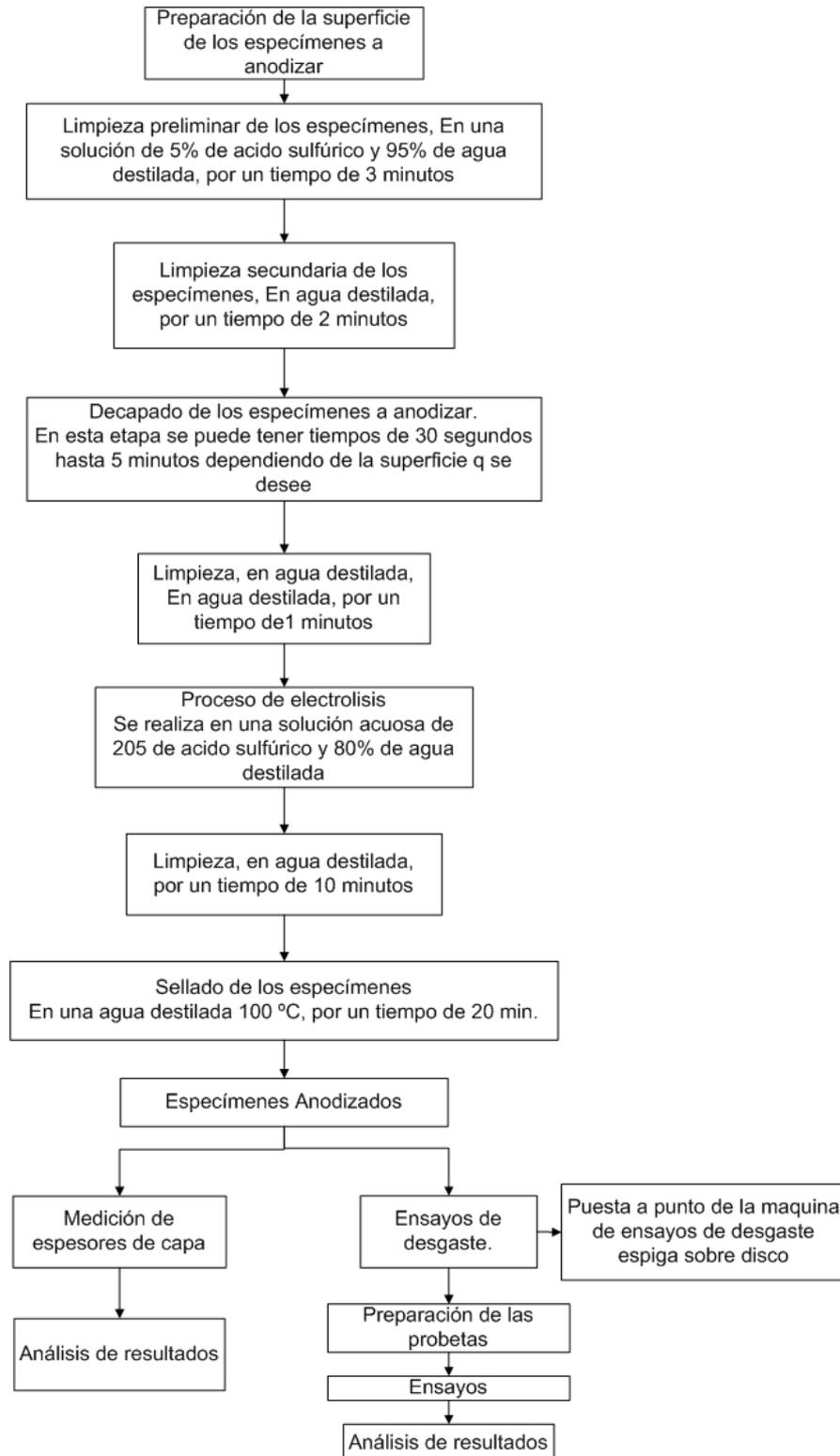
Además, se realizarán ensayos de desgaste, en una máquina tipo espiga sobre disco, de los cuales se obtendrán los gráficos de razón de desgaste vs. capa anódica.

Antes de realizar los ensayos de desgaste se deberá calibrar la máquina de ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco, tomando en cuenta la velocidad de rotación y el radio de las probetas.

El desgaste se hará contra una espiga de acero AISI 4340, con el propósito de obtener la razón de desgaste de la capa anódica.

Se realizarán tiempos de inmersión de 9, 15, 30, 45 y 60 min, por cada tiempo de inmersión se anodizarán 4 especímenes.

## 5.1 FLUJOGRAMA DE LA METODOLOGÍA



## 5.2 PROCESO DE ANODIZADO

El proceso consiste en someter al aluminio a una inmersión de ácido sulfúrico al pasar corriente se libera el oxígeno que se dirige al ánodo que al reaccionar con el aluminio genera una capa de óxido cuyo espesor varía con el tiempo de paso de la corriente. Para cerrar los poros que presenta la superficie del aluminio anodizado se sumergen los especímenes en agua desmineralizada a una temperatura de 100 °C durante 60 min. De esta manera queda finalizado el procedimiento, la vida útil de este acabado es proporcional al espesor de la capa anódica obtenida<sup>10, 11 y 12</sup>.

A continuación se describen las operaciones más importantes del proceso para la obtención de la capa anódica.

### A. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA, DECAPADO Y LIMPIEZA DE LA SUPERFICIE

Este proceso consiste en eliminar todas las impurezas presentes en la aleación de aluminio 6061-T6, la calidad de la superficie influye en la calidad de la capa anódica que se va a obtener, el propósito de contar con una superficie limpia para el proceso de electrólisis, es el obtener al final del proceso una superficie color mate. La preparación de la superficie de los especímenes, consta de seis etapas, las cuales se describen a continuación:

- i) Limpieza preliminar. Consiste en eliminar las irregularidades superficiales e incrustaciones de la aleación de aluminio, dicho proceso se realizó, cilindrando los especímenes, y luego se lija con papel abrasivo de SiC número 600 y 1200, con el propósito de obtener una superficie similar a la del pulido tipo espejo. Esto ayudará a tener un mejor acabado superficial de la capa anódica.
- ii) Limpieza química. Consiste en eliminar las grasas y aceites que puedan estar presentes en la superficie del aluminio de forma superficial, la

limpieza química se lleva a cabo en una solución de 95% de agua destilada y 5% de ácido sulfúrico, durante un período de tiempo que dependerá del tipo de acabado que se desea, los especímenes en la solución deberán de agitarse de forma suave y constante, para que la limpieza sea uniforme, teniendo cuidado con el manejo del ácido y sin tocar el espécimen como se presenta en la Fig. 5.1.

- iii) Primer enjuague se procede a eliminar los restos de ácido existentes en el espécimen, así como también todos los restos de contaminantes eliminados, todo lo anterior en agua destilada al 100% con agitación moderada. Teniendo cuidado de no tocar el espécimen, de lo contrario se deberá de iniciar el proceso. En la Fig. 5.2, se presenta la forma adecuado de realizar esta etapa.



Fig. 5.1. Desengrasado de los especímenes, en una solución de 5% de ácido sulfúrico y 95% de agua destilada.



Fig. 5.2. Eliminación de residuos de ácido sulfúrico, producto del desengrasado de los especímenes.

- iv) Segundo enjuague, se continua con la eliminación de los residuos de ácido y contaminantes en agua destilada al 100%, teniendo cuidado de proveer movimientos suaves, se debe tener especial cuidado en no tocar con ningún elemento los especímenes, de lo contrario se deberá iniciar el proceso de limpieza.
- v) Decapado. Consiste en remover las capas de oxidación natural del aluminio, mediante soda cáustica a una temperatura de 40 grados centígrados durante un período de tiempo de no más de 5 minutos, durante este tiempo se deberán proveer a la solución movimientos de agitación de suaves a moderados, con el propósito de remover por completo la capa, y dejar expuesto el aluminio virgen para ser anodizado.

Se deberá tener especial cuidado en no tocar la pieza debido a que esta estará en condiciones aproximadas de un material virgen, el proceso de decapado se muestra en la Fig. 5.3.

vi) Limpieza posdecapado. Esta limpieza se realiza en dos etapas en depósitos diferentes con agua destilada corrida, con períodos de tiempo por etapa de aproximadamente 30 segundos, con el propósito de remover los restos de soda cáustica y material separado del espécimen.

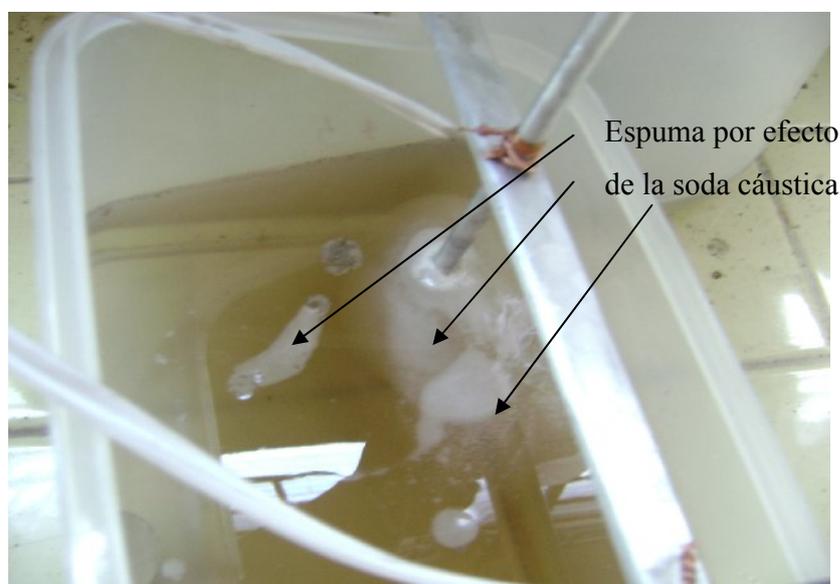


Fig. 5.3. Decapado del material, en la imagen se presenta la acción de la soda cáustica sobre la aleación de aluminio.

## B. ANODIZADO

El proceso se desarrolla en un Depósito con la solución a una temperatura entre 24 y 30 °C, las piezas de aluminio se colocan en soportes conductores conectados al polo positivo (ánodo) de una fuente de poder de corriente continua, el polo negativo (cátodo) es de un material inerte y el electrolito es una solución acuosa de ácido sulfúrico, único que permite obtener capas

protectoras de espesores importantes, en la Fig.5.4 a 5.7. se presenta la secuencia del proceso de electrólisis desde el depósito vacío donde se observa el cátodo y los sistemas de control de temperatura y eléctricos<sup>4 y 6</sup>.



Fig. 5.4. Depósito para la realización de la electrólisis donde se observa el cátodo, antes del inicio del proceso de anodizado.

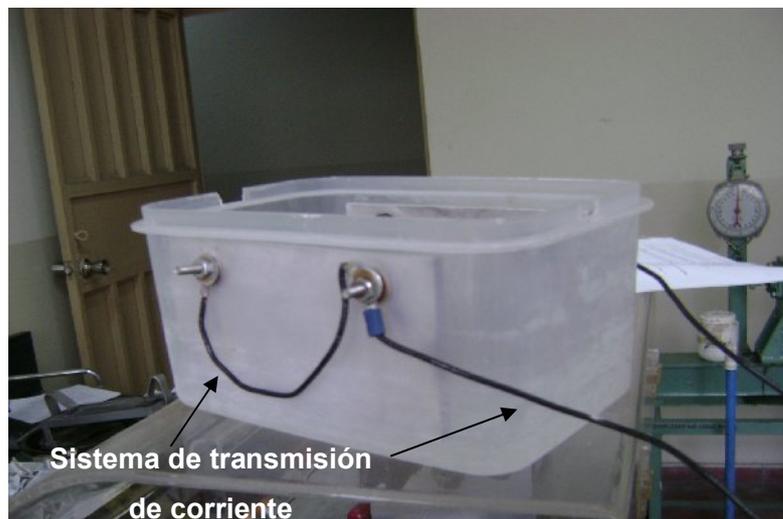


Fig. 5.5. Depósito para la realización de la electrólisis donde se observa el cableado para la transmisión de corriente.

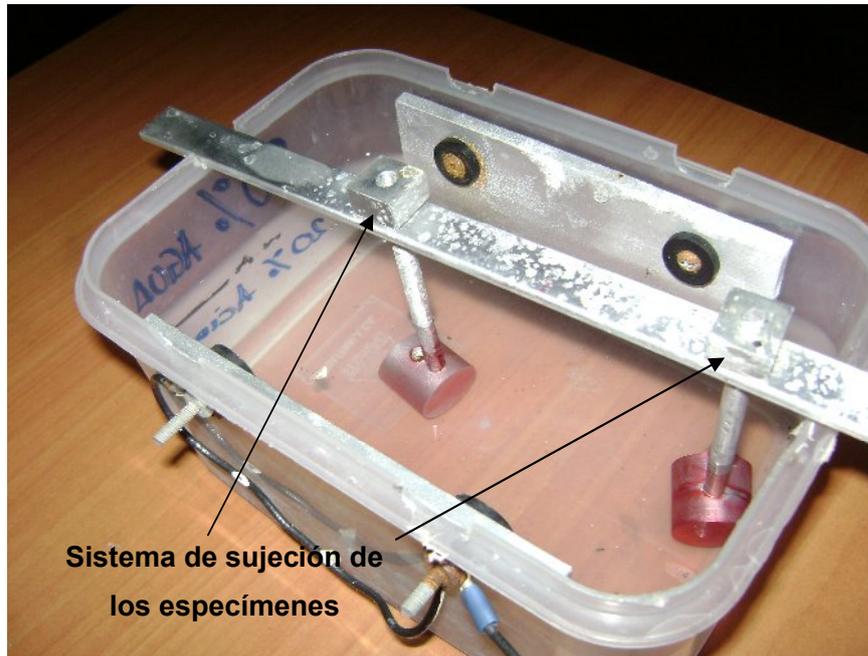


Fig. 5.6. Colocación de los especímenes en el depósito para la realización de la electrólisis.



Fig. 5.7. Colocación de los dispositivos de control y energización del proceso.

Al preparar la solución ácido – agua, se deberá agregar primero el agua y luego el ácido en forma continua y despacio para evitar un sobre calentamiento de la solución, luego se procede a la realización de las conexiones eléctricas y sistemas de control eléctrico y de temperatura. El proceso electrolítico se desarrolla en dos etapas como se describen a continuación:

- i) Las especímenes se colocan en los soportes y se sumergen en la solución, para luego energizarlos, esta etapa dependerá de los tiempos calculados, como se presenta en la Fig. 3.7.
- ii) Luego los especímenes se retiran de la solución y se enjuagan en dos etapas en depósitos diferentes con agua destilada, por un período de tiempo de 5 minutos por etapa, con movimientos suave.

### **C. SELLADO**

Esta etapa es la última operación del proceso de anodizado sin colorear, y se realiza por inmersión de las piezas anodizadas en agua desmineralizada en ebullición, por un período de tiempo de 60 minutos. Esta operación de sellado es la que permite mantener estable la capa anódica producida, a través del tiempo. En este proceso se transforma la alúmina en aluminio monohidratado, con lo cual se dilata produciendo un mayor volumen, y cierran herméticamente los poros de la capa anódica. Esta operación es indispensable, el proceso de sellado se presentan en la Fig.5.8.

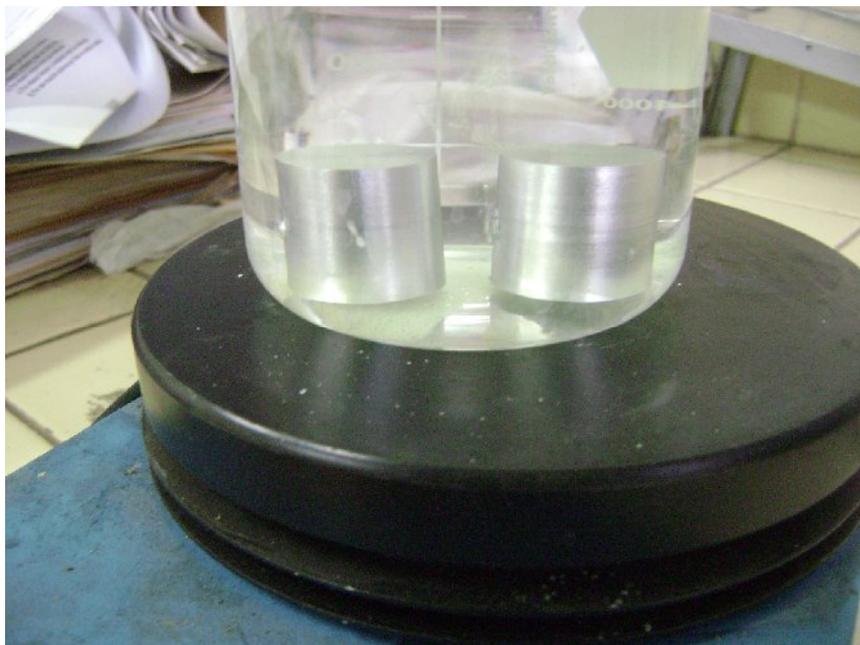


Fig. 5.8. Procesos de sellado el cual se realiza en agua desmineralizada a 100 °C.

### **5.3 DETERMINACIÓN DE ESPESORES DE LOS RECUBRIMIENTOS OBTENIDOS EN EL PROCESO**

Al terminar el proceso de anodizado, se procede a la medición de las capas anódicas obtenidas a partir de diferentes tiempos, por medio de un medidor digital para recubrimientos sobre superficies ferrosas (F), basado en el método de corrientes de Eddy, dicho medidor de capas se presenta en la Fig. 5.9 a y b.

El espesor del recubrimiento es de suma importancia para su desempeño o vida útil. Este método de corriente Eddy es no-destructivo y es apropiado para medir espesores de capa anódica en aluminio, así como para espesores en la mayoría de recubrimientos no-conductivos en metales base no-magnéticos.

La medición de la capa se realizó de acuerdo a la norma ASTM B 244 – 97, en la Fig. 5.10, se presentan los especímenes anodizados.



En las tablas 5.1, se presentan los espesores de las capas anódicas naturales y artificiales obtenidas en el proceso de acuerdo a los tiempos de inmersión.

Tabla 5.1 Espesores de capa y promedio de capas anódicas.

Anodizado	Tiempos de inmersión, min	Probeta #	Espesores de capa, $\mu\text{m}$	Espesores de capa promedios $\mu\text{m}$
Natural		1	1	1
		2	1	
		3	1	
		4	1	
Artificial	9	5	3	2.25
		6	3	
		7	1.5	
		8	2	
	15	9	5	5.25
		10	7	
		11	5	
		12	4	
	30	13	8	7.75
		14	8	
		15	7	
		16	8	
	45	17	10	12
		18	13	
		19	13	
		20	12	
	60	21	17	17.75
		22	15	
		23	19	
		24	20	

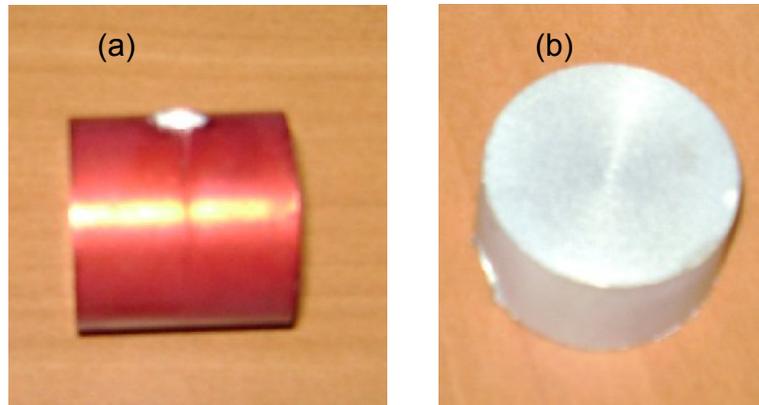


Fig. 5.10. Especímenes anodizados, (a) espécimen anodizado y coloreado (b) espécimen sin coloreo.

#### **5.4 DETERMINACIÓN DE LA RAZÓN DE DESGASTE**

En esta sección primeramente se calibrará la máquina de ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco, la cual se presenta en las Fig. 5.11 y 5.12, posteriormente se realizarán los ensayos de desgaste, con el fin de obtener la razón de desgaste para los diferentes espesores de capa anódica, los cuales se realizarán a carga y velocidad de desplazamiento constante.

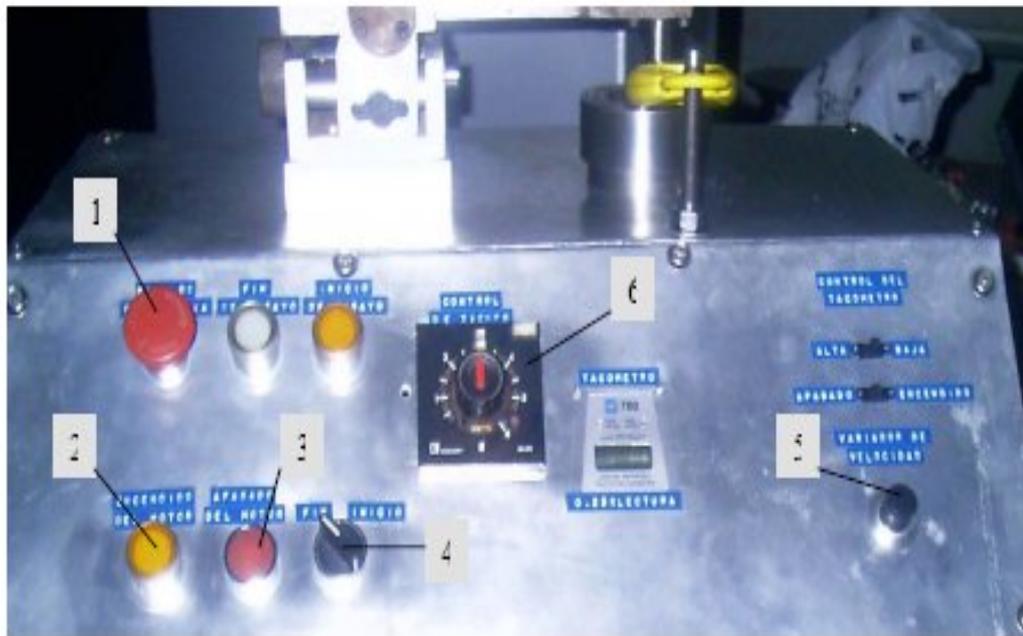


Fig. 5.11. Controles de Máquina de desgaste tipo espiga sobre disco.

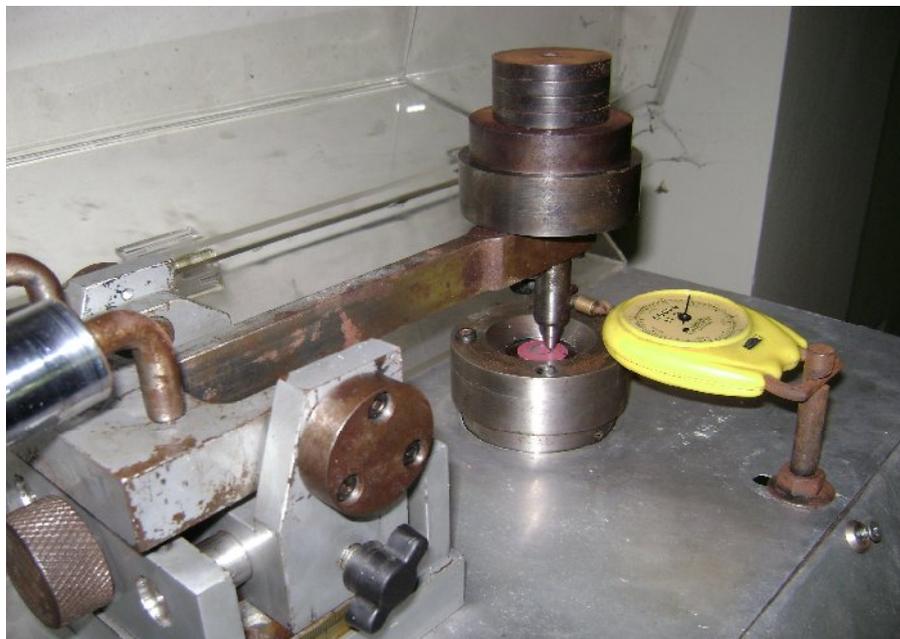


Fig. 5.12. Ensayos en la Máquina de desgaste tipo espiga sobre disco.

El ensayo de desgaste es el rozamiento entre dos superficies para nuestro caso se utilizara un disco anodizado de aleación de aluminio 6061-T6.

La espiga, a utilizar presenta las siguientes características:

- i) Material: AISI 4340
- ii) Composición en % en peso: 0.35 C, 0.03 Cr, 1.5Ni, 1.5 Mo.
- iii) Dureza: 28-35 RC
- iv) Densidad del material: 7806 kg/m<sup>3</sup>

### CALIBRACIÓN DE LA MÁQUINA

En la tabla 5.2 se presentan las condiciones generales para la calibración de la máquina.

Tabla 5.2 Condiciones generales para la calibración de la máquina de ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco

$d$ , m	$v$ , m/s	$F$ , N	$r$ , mm
1	0.36	10	8

A partir de las consideraciones generales se calculan los parámetros de velocidad de rotación del disco y el tiempo de duración del ensayo, tal como se presentan a continuación:

- i) Velocidad de Rotación.

La velocidad de rotación del disco se determina a partir de la Ec. (5.1):

$$\eta = \frac{60v}{2\pi r} \quad (5.1)$$

Donde:

$\eta$ : Velocidad de rotación del disco

$v$ : Velocidad de deslizamiento

$r$  : Distancia entre el centro del disco y la espiga

Tomando los siguientes valores de parámetros para velocidad de deslizamiento y radio como:

$$v = 0.36 \text{ m/s}$$

$$r = 8 \text{ mm (0.008 m)}$$

Sustituyendo los valores anteriores en la Ec. 5.1 resulta:

$$\eta = \frac{60v}{2\pi r} = \frac{60(0.36)}{2\pi(0.008)} = 429.7173 \text{ rpm} \approx 430 \text{ rpm}$$

## ii) Tiempos de ensayo

Los tiempos del ensayo de desgaste por probeta se calculan en base a la Ec. 5.2.

$$t = \frac{d}{v} \quad (5.2)$$

Donde:

t: Tiempo de duración del ensayo

v: Velocidad de deslizamiento

d: Distancia de deslizamiento

Luego fijando los valores de velocidad y distancia de deslizamiento a:

$$v = 0.36 \text{ m/s}$$

$$d = 1.0 \text{ m}$$

Se sustituyen en la ecuación 5.2, queda:

$$t = \frac{d}{v} = \frac{1}{0.36} = 2.778 \text{ min.} \approx 3.0 \text{ min.}$$

Luego, de calcular la velocidad de rotación del disco y tiempo de ensayo, estos son programados en la máquina de ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco.

## 5.5 ANÁLISIS DE RESULTADO

Para la realización del análisis de resultados es necesario conocer el coeficiente de fricción el cual se determina a partir de la Ec. 5.3:

$$\mu = \frac{f_f}{F} \quad (5.3)$$

El cálculo de la pérdida de peso se realiza por medio de la Ec.5.4

$$\Delta W = W_i - W_f \quad (5.4)$$

Donde:

$W_f$ : Peso final del disco, después del ensayo de desgaste

$W_i$ : Peso inicial del disco, antes del ensayo de desgaste

La razón de desgaste, se calcula por medio de la Ec. 5.5

$$q = \frac{\Delta W}{\rho} \quad (5.5)$$

Donde:

$\Delta W$ : Diferencia de pesos de la probeta

$\rho$ : Densidad del aluminio, para la aleación de aluminio 6061, se trabajara con un valor promedio de 2.70 g/cm<sup>3</sup>.

Los datos obtenidos a partir de los ensayos realizados en la máquina de espiga sobre disco, se presentan en la tabla 5.3.

Además, en la Fig. 5.13 se presentan unas probetas a las cuales se les realizó el ensayo de desgaste, en éstas se puede observar la huella producida por el desgaste, debido al rozamiento con la espiga.

Tabla 5.3 Razón de desgaste y pérdida de peso de las probetas

Anodizado	Tiempo de inmersión, min	Probeta #	W <sub>i</sub> , Oz	W <sub>f</sub> , Oz	ΔW, Oz	ΔW/W <sub>i</sub>	Espesores de capa μm	Razón de desgaste 10 <sup>-3</sup> , cm <sup>3</sup>
Natural		1	0.2077	0.2058	0.2058	0.9052	1	19.7811
		2	0.2076	1.2058	0.2057	0.9334	1	20.4125
		3	0.2078	2.2058	0.2056	0.9634	1	21.0438
		4	0.2077	3.2058	0.2058	0.9052	1	19.7811
Artificial	9	5	0.2149	0.2134	0.00148	0.6888	3	15.5723
		6	0.2117	0.2102	0.00148	0.6992	3	15.5723
		7	0.2123	0.2106	0.00172	0.8101	1	18.0976
		8	0.2061	0.2046	0.00153	0.7424	2	16.0984
	15	9	0.2149	0.2137	0.00102	0.5724	5	12.9419
		10	0.2123	0.2113	0.00118	0.4804	7	10.7323
		11	0.2125	0.2113	0.00150	0.5553	5	12.4158
		12	0.2455	0.2440	0.00188	0.6110	4	15.7828
	30	13	0.2235	0.2226	0.0009	0.4027	8	9.4697
		14	0.2125	0.2116	0.0009	0.4189	8	9.3645
		15	0.2093	0.2083	0.0010	0.4549	7	10.0168
		16	0.2197	0.2188	0.0009	0.4006	8	9.2592
	45	17	0.2171	0.2164	0.0007	0.3224	10	7.3653
		18	0.2263	0.2258	0.0005	0.2209	13	5.2609
		19	0.2093	0.2088	0.0005	0.2246	13	4.9452
		20	0.2117	0.2112	0.0005	0.2409	12	5.3661
60	21	0.2235	0.2232	0.0003	0.1521	17	3.5774	
	22	0.2093	0.2089	0.0004	0.1911	15	4.2087	
	23	0.2197	0.2195	0.0002	0.1047	19	2.4200	
	24	0.2123	0.2122	0.0002	0.0754	20	1.6835	



Fig. 5.13. Huellas producidas por el desgaste de la espiga sobre la probeta.

A partir de los datos obtenidos de los ensayos de desgaste realizados en la máquina de espiga sobre disco, se pueden obtener las curvas de espesor de capa anódica vs tiempo de inmersión, razón de desgaste vs espesor de capa anódica y razón de desgaste vs Tiempo de inmersión razón, las cuales se presenta en la Fig. 5.15 - 5.17, Respectivamente.

En la figura 5.15, se puede observar la tendencia del incremento en el espesor de la capa anódica, en función de los tiempos de inmersión en la solución acuosa, además otras de las variables que influyen en el crecimiento de la capa anódica son: la intensidad de la corriente, la temperatura del proceso electrolítico y el volumen de la solución. El crecimiento de máximo de capa anódica alcanzado fue de  $20\ \mu\text{m}$  con un tiempo de inmersión de 60 min (ver

tabla 5.1), Además, en la figura 5.15, seá graficado la tendencia de los valores promedios de los espesores de las capa obtenidas en cada tiempo. La variación en los datos obtenidos, es debido a los pocos segundos de diferencia en el retiro de los especímenes de la solución electrolítica.

Para tiempos de inmersión pequeños el crecimiento de la capa anódica fue poco, con respecto a la capa natural de oxido formada en los aluminios.

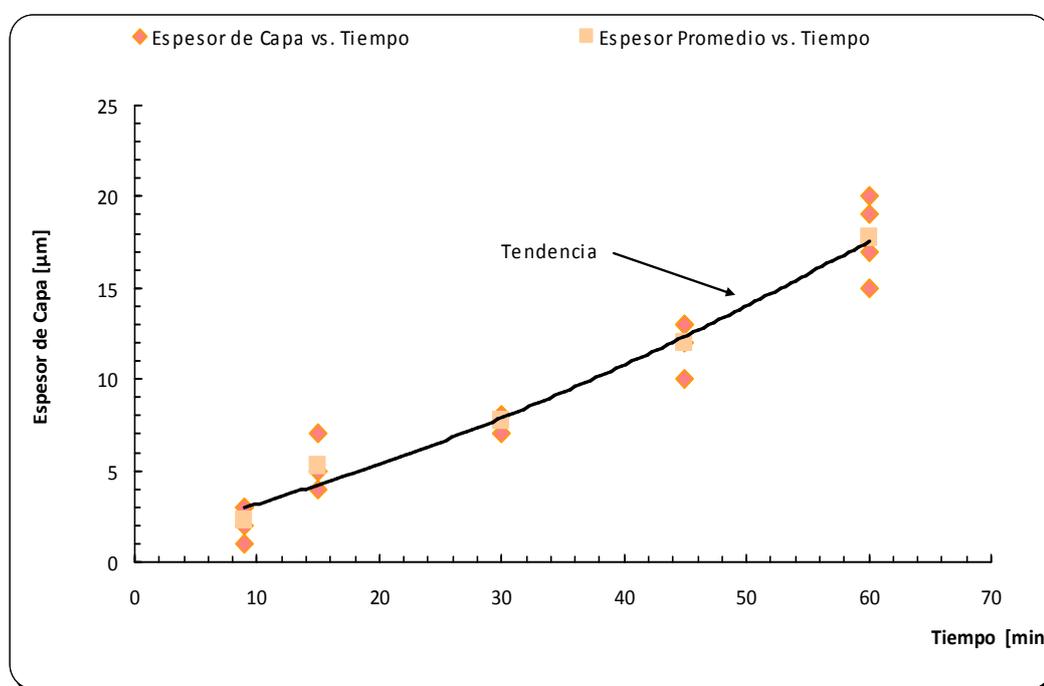


Fig. 5.15. Grafica de Espesor de capa anódica vs Tiempo de inmersión

La razón de desgaste se conoce como la pérdida de material producto del rozamiento entre dos superficies, en este caso; dos metales, el desgaste del material depende de los espesores de capa anódica generados durante el proceso de anodizado.

En la Fig. 5.16, se presentan los valores de la razón de desgaste vs espesores de capa anódica con sus correspondiente promedio, para el caso de los

espesores de capa anódica generados a partir de los tiempos de inmersión de 9 min la razón de desgaste es de aproximadamente 18.0976 (ver tabla 5.3), en la cual se ha desgastado por completo la capa anódica generada.

Para los espesores de capa anódica mayores a los de tiempos de inmersión de 9 min, la razón de desgaste comienza a decrecer. Para espesores de capa anódica de 20  $\mu\text{m}$  la razón de desgaste es de 1.6835, para el cual la espiga no desgasto la capa anódica generada en el proceso de anodizado.

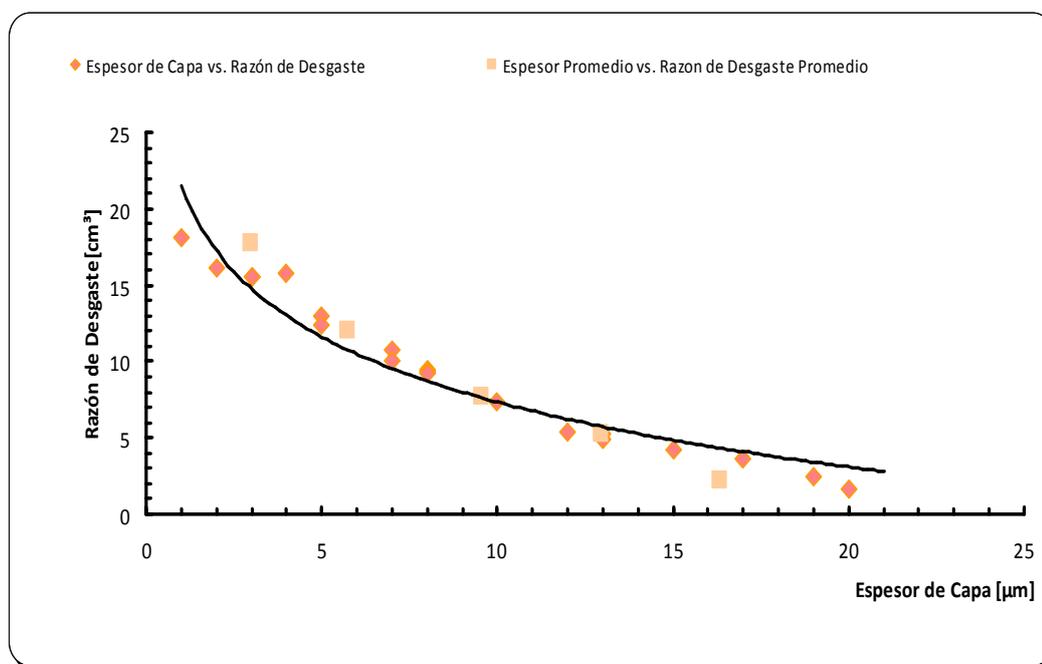


Fig. 5.16. Grafica de Espesor de capa anódica vs Razón de desgaste

En la Fig. 5.17, se presenta el cambio la razón de desgaste de la capa anódica vs los tiempos de inmersión con sus correspondientes promedios, para este caso se ha trazado una línea de tendencia de los valores promedios de capa anódica generadas a partir de los tiempos de inmersión utilizados.

Ya que industrialmente, por lo general, no se miden los espesores de las capas anódicas, obtenidas, si no solo el tiempo de inmersión.

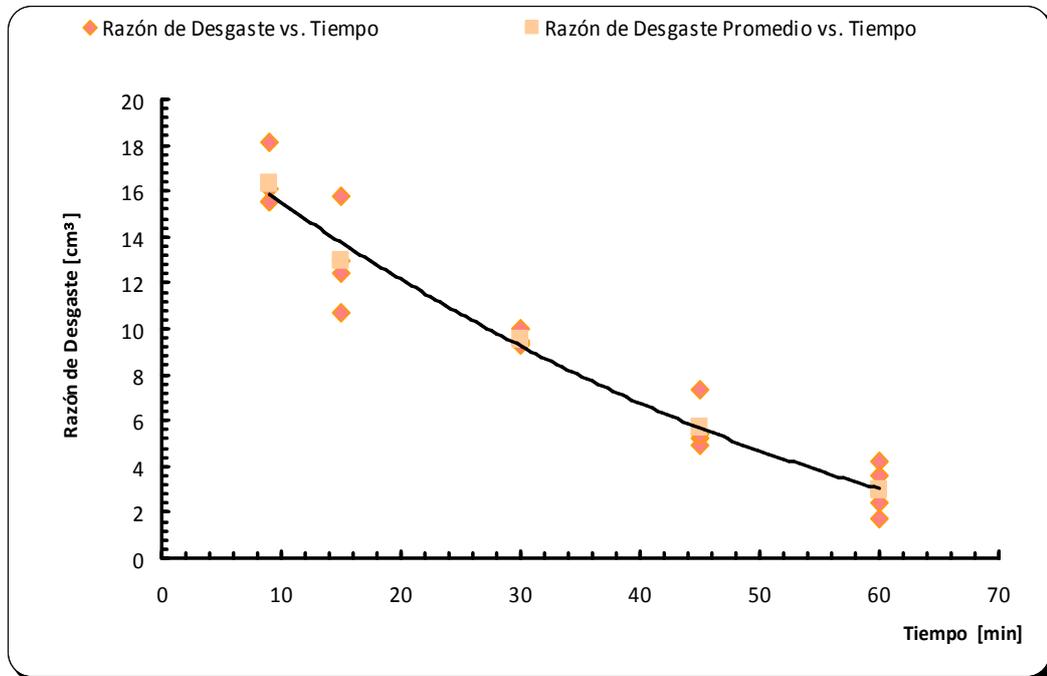


Fig. 5.17. Grafica de Razón de desgaste vs Tiempo de inmersión

## CONCLUSIONES

Con el sistema construido es posible obtener capas anódicas, mediante el procedimiento electrolítico, con espesores de hasta 24 micrómetros sobre una aleación de aluminio 6061-T6, utilizando una solución acuosa de 80% de agua destilada y 20% ácido sulfúrico, en un intervalo de temperatura de 24-30 °C , con una densidad de corriente 2.65 A, con volúmenes de 2.65 litros y un cátodo de aluminio comercialmente puro.

Se ha podido encontrar que la velocidad de crecimiento de la capa anódica es de 0.29  $\mu\text{m}/\text{m}$  sobre una aleación de aluminio 6061-T6 para ello se anodizo durante los tiempos 9, 15, 30, 45 y 60 minutos.

La razón de desgaste obtenida varía en función del espesor de la capa anódica, por lo cual a mayores espesores de capa anódica se tiene menor razón de desgaste.

## Referencia

- Normas de la ASTM B 244 – 97, B 137 - 95
- M.J. Hurtado, The Anodic Oxidation of Aluminium: Fabrication.
- H. Masuda, A. Abe, M. Nakao, A. Yokoo, T. Tamamura and K. Nishio, Adv. Materials 15 (2003) 161
- H. Masuda, K. Yada, and A. Osaka, Jpn. J. Appl. Phys. 37 (1998) L1340.
- H. Masuda, F. Hasegwa and S. Ono, J. Electrochem. Soc. 144 1997)
- A.G. Muñoz, Anodizado de superficies de Aluminio modificadas por deposición catódica de Ni y Co.
- Vargas Hernández, Crecimiento de películas de oxido de aluminio por métodos electrolíticos.
- 2 N. P. Fedotiev, S.Y. Grilijes, Electropulido y anodización de metales, p. 188, 189 (1972).
- G. E. Thompson and G. C. Wood, Corrosion Aqueous Processes and passive Films, Treatise on Material Science and Technology V 23, Ed. J.C. Scully, Academic Press Inc., London p. 205, (1983).
- R. W. Franklin, Conference on Anodizing Aluminium, Nottingham 1961, Aluminium Development Association.
- G. C. Wood, Oxides and Oxides Films, V 2, Ed. J. W. Diggle, Marcel Dekker Inc. New York, p.167 (1973).
- Manero Planella, j.M, Aleaciones Ligeras, Universidad Politécnica de Cataluña.
- Reglamento especial en material de sustancias, residuos y desechos peligrosos, Ministerio de medio ambiente y recursos naturales.
- Ley General de Medio ambiente, Ministerio de medio Ambiente.
- Categorización de Actividades, Obras o Proyectos conforme a la Ley del Medio Ambiente, Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- García Arias, González Chicas, Villatoro Andrade, Diseño y construcción de una maquina para ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco, Universidad de El Salvador.

- Cordova t. Manual de seguridad del manejo del ácido sulfúrico
  
- Ciencia e Ingeniería de materiales  
Donald R. Askeland  
Tercera Edición, International Thomson Editores.
  
- Tecnología de materials  
Carlos Ferrer Giménez – Vicente Amigo Borrás  
Primera Edición, Afaomega grupo editor.
  
- Ciencia e Ingeniería de materiales  
William D. Callister, Jr  
Tercera Edición, Editorial Reverté, S.A
  
- Introducción a la metalurgia física  
Synhey H. Avner  
Segunda Edición, McGraw- Hill