



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLÁN**

**Manual para diferentes
procesos de anodizado de
aluminio.**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Químico

P R E S E N T A

Irving Cerino Carrasco

ASESOR:

Q. Celestino Silva Escalona

Cuatitlán Izcalli, Estado de México, 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
SECRETARÍA GENERAL
DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN

ASUNTO: VOTO APROBATORIO

DR. DAVID QUINTANAR GUERRERO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE

ATN: DRA. MARIA DEL CARMEN VALDERRAMA BRAVO
Jefa del Departamento de Exámenes Profesionales
de la FES Cuautitlán.

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

Manual para diferentes procesos de anodizado de aluminio.

Que presenta el pasante: **Irving Cerino Carrasco**

Con número de cuenta: **314114501** para obtener el título de: **Ingeniero Químico**

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

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cuautitlán Izcalli, Méx. a 28 de junio de 2022.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	Dr. Eligio Pastor Rivero Martínez	
VOCAL	Q. Celestino Silva Escalona	
SECRETARIO	MCIBQ. Ana María Sixto Berrocal	
1er. SUPLENTE	MGAA. Ángel Raygoza Trejo	
2do. SUPLENTE	Dra. Francisca Alicia Rodríguez Pérez	

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

MCVB/cga*

Agradecimientos

A mi familia, por siempre brindarme todo su apoyo y amor incondicional, a mis padres, gracias por su compañía, regaños y todos los sacrificios que han hecho por mí durante toda mi vida, permitiéndome ser el hombre que soy. Araceli mi eterna confidente y amiga. Gracias por siempre confiar en mí, por nunca darme la espalda, permitir tener nuevas experiencias juntos, "Tu amor está en todas partes a donde voy". Mario gracias por el apoyo que siempre me diste para la escuela y siempre tenderme la mano cuando necesito ayuda. Jamás me alcanzara la vida para poder pagarles todo lo que me han dado.

A mi hermana por darme todo su apoyo, dándome consejos, alentándome a tomar nuevos retos, cumplir mis sueños y no dejar me rendirme. Gracias por ser mi compañera de aventuras y experiencias, acompañarme a explorar nuevos sitios, probando nuevas, tomado el riesgo, a pesar de que ni yo sepa que estamos haciendo o donde estamos, "Cuando te he fallado".

A mis amigos, Mario Armando (Taverpupi :v), por ser mi mejor amigo, estar juntos, en las buenas y en las malas, por cada buen momento que pasamos, el apoyo que me brindaste, siempre fuiste el mejor compañero de equipo. Fernanda mi mejor amiga, siempre platicando y chismeando, te agradezco por considerarme un amigo, confiar en mí y brindarme tu apoyo. Lady gracias por estar siempre con Mario y conmigo, ayudarnos a solucionar nuestras tonterías, siempre contaras con nuestro apoyo.

A mi asesor, profesor Celestino, por toda la paciencia, el apoyo, sus consejos, brindarme toda su ayuda y las herramientas necesarias y siempre recibirme de buen humor.

A los profesores Pastor Rivero, Ana Maria Sixtos, Ángel Raygoza, Alicia Rodríguez, jurado de este trabajo, gracias por su paciencia, tiempo guiándome en el desarrollo de este trabajo.

A todos los profesores que compartieron sus conocimientos, experiencias, por brindar todo su apoyo durante toda la carrera y en especial a Margarita Castillo, Maria Elena Quiroz, Carlos Orozco, Alicia Rodríguez, Celestino Silva, Georgina Espinosa, Juan José Sánchez, Guadalupe Franco, Citlali Ruiz. Grandes mentores y amigos.

A la UNAM, por permitirme vivir las experiencias y los recuerdos más bellos. Conocer a las personas más importantes, por abrirme las puertas en el hermoso CCH-Naucalpan desde agosto del 2013. Y brindarme una gran cantidad de conocimientos, siempre estaré agradecido y orgulloso de pertenecer a esta institución.

Se agradece al programa de cátedras de investigación; proyecto CI2226.

Índice

Objetivos.....	7
Objetivo general.....	7
Objetivos particulares	7
Introducción	8
Capítulo 1: Aluminio: usos, aleaciones y sus características (físicas, químicas y mecánicas)	11
1.1: Química del aluminio	11
1.2: Clasificación según sus propiedades físicas y mecánicas	11
1.3: Tipos de aleaciones.....	15
1.4: Clasificación “norma AA (aluminium association)	16
1.5: Clasificación de aleaciones a partir de su comportamiento durante el proceso de anodizado.	20
1.6: Clasificación por el tipo de templado	21
1.7: Algunas aleaciones que son compatibles con el anodizado.....	23
Capítulo 2: Anodizado.....	26
2.1: Etapas del anodizado	28
2.1.1: Pulido	32
2.1.2: Desengrasado	32
2.1.3: Enganchado	32
2.1.3: Decapado	33
2.1.4: Matizado	33
2.1.5: Formación de capa de óxido.....	33
2.1.6: Neutralizado	37
2.1.7: Teñido de la capa de óxido.....	37
2.1.7.3: Resistencia del teñido a los agentes atmosféricos.....	40
2.1.8: Sellado de la capa de óxido.....	40
Capítulo 3 Condiciones de operación.....	42
3.1: Tipos de electrolitos	43
3.1.1 Anodizado mediante ácido crómico	43
3.1.2 Ácido oxálico	44
3.1.3 Anodizado con ácido sulfúrico	45
3.1.4 Anodizado de capa dura.	47

3.2 Factores que influyen en la operación.....	48
3.2.1 Tiempo	49
3.2.2 Concentración	50
3.2.3 Tensión.....	52
3.2.4 Temperatura	53
Capítulo 4: Equipos de operación	55
4.1: Clasificación de plantas de anodizado	55
4.2: Equipos de pulido	55
4.2.1: Pulido mecánico	56
4.2.2: Pulido químico	64
4.2.3: Pulido electroquímico.....	65
4.3: Equipos eléctricos.....	67
4.4: Soportes y estructuras	67
4.5: Tinas.....	68
4.5.1: Tinas y equipos para desengrasado y decapado	68
4.5.2: Tinas de enjuague y neutralizado	69
4.5.3: Tanque de teñido.....	70
4.5.3 Tanque de sellado	71
4.6: Celda de anodizado (tanque de anodizado y electrodo)	71
4.6.1: Tanque de anodizado	71
4.6.2: Electroodos.....	72
4.7: Sistema de refrigeración	74
4.8: Sistema de agitación.....	74
4.9: Sistema de extracción y lavado de gases	74
Capítulo 5: Teñido y acabados del recubrimiento.....	76
5.1: Acabado brillante	76
5.2: Acabado mate.....	77
5.3: Acabado natural.....	78
5.4: Duranodik	78
5.5: Teñido del aluminio.....	79
5.5.1: Problemas, causas y soluciones inmediatas cuando se presentan problemas de teñido	81
5.6: Sellado.....	83

Capítulo 6: Normativa de control de calidad.....	84
6.1: Organismos regulatorios nacionales e internacionales	84
6.1.1: Normas ISO (Organización Internacional de Normalización)	84
6.1.2: Norma Mexicana (NMX) y Norma Oficial Mexicana (NOM).....	85
6.1.3: Normas ASTM y AAMA	85
6.2: Características del recubrimiento	85
6.2.1: NMX-W-138-SCFI-2004: Metales no ferrosos-aluminio y sus aleaciones- anodización-recubrimientos de óxido anódico en aluminio-especificaciones generales.....	85
6.2.2: ASTM B580-79: Especificación estándar para recubrimientos de óxido anódico en aluminio.....	87
6.2.3: AAMA 611-12: Especificación voluntaria para aluminio arquitectónico anodizado.....	88
6.2.4: ISO 7599-2010: Anodización del aluminio y sus aleaciones. Especificaciones generales para recubrimientos de oxidación anódica sobre aluminio.....	89
6.3: Pruebas y procedimientos de calidad.....	89
6.3.1: ASTM 457-67: Método de prueba estándar para medir la impedancia de recubrimientos anódicos en aluminio.....	89
6.3.2: ASTM B 368: Método de prueba estándar para la prueba de niebla salina con ácido acético acelerado con cobre.....	90
6.3.3: NMX-W-127-SCFI-2016: Aluminio y sus aleaciones-Anodizado- Recubrimientos de óxido anódico coloreados-Resistencia a la decoloración por la luz ultravioleta-Método comparativo de prueba.....	90
6.3.4: NMX-W-119-SCFI-2016: Aluminio y sus aleaciones-Anodizado- Determinación del espesor de recubrimientos de óxido anódico-Medición no destrucciona por microscopio de haz dividido.....	91
6.3.5: ISO 2143:2010 Estimación de la pérdida de poder de absorción de los recubrimientos de oxidación anódica después del sellado. Ensayo de mancha de tinte con tratamiento ácido previo.	92
Conclusiones	93
Bibliografía	95
Anexo 1.....	99
ASTM B580-79: Especificación estándar para recubrimientos de óxido anódico en aluminio	99
Superficie significativa	99

ISO 7599:2010: Anodización del aluminio y sus aleaciones. Especificaciones generales para recubrimientos de oxidación anódica sobre aluminio.....	99
ASTM B638: Método de prueba estándar para la prueba de niebla salina con ácido acético acelerado con cobre.....	100
NMX-W-127-SCFI-2016: Aluminio y sus aleaciones-Anodizado-Recubrimientos de óxido anódico coloreados-Resistencia a la decoloración por la luz ultravioleta-Método comparativo de prueba.	101
NOM-W-119-SCFI-2016: Aluminio y sus aleaciones-Anodizado-Determinación del espesor de recubrimientos de óxido anódico-Medición no destructiva por microscopio de haz dividido.	102

Objetivos

Objetivo general

Desarrollar un manual, de información más reciente, para la obtención de un recubrimiento en aluminio, a partir de un proceso de oxidación anódica, buscando definir las técnicas más sencillas, como las etapas a llevar a cabo en el anodizado.

Objetivos particulares

- Definir el mejor proceso para realizar el anodizado en aleaciones de aluminio.
- Identificar y definir las condiciones óptimas para obtener una capa protectora resistente y de mayor calidad.
- Seleccionar los equipos a utilizar, buscando definir los más eficientes.
- Buscar y prevenir las variables que puedan afectar los procesos de anodizado.

Introducción

El aluminio es uno de los metales más comunes en la corteza terrestre, ocupando el 3° en abundancia y un porcentaje de 7.9% de la masa total de la superficie terrestre, sin embargo, el aluminio no se encuentra en su forma elemental o metálica. El aluminio se encuentra principalmente en forma de óxido, especialmente en forma de Bauxita la cual está conformada por $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ en un 86%, SiO_2 en 8%, Fe_2O_3 2%, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 0.3% y $\text{CaO} + \text{MgO}$ 0.6% [33].

El auge en los últimos años se debe a su gran facilidad de ser utilizado, así como las grandes propiedades con las que cuenta, comparándolo con otros metales como el hierro, cobre, o latón. El aluminio presenta una densidad muy baja siendo aproximadamente 2.7 g/cm^3 , por lo que es más ligero en comparación al acero, pero con una resistencia mecánica muy alta, permitiendo que sea utilizado en arquitectura, debido a su resistencia a la tensión y a su capacidad de alargarse o comprimirse [10].

El aluminio posee la ventaja de poder mejorar sus propiedades mecánicas a partir de formar aleaciones con diferentes metales, dependiendo del uso que se le dé, así como el entorno en el que se encuentre ya que según sea su aleación será su resistencia a la corrosión. Sin embargo, existen procesos para aumentar la resistencia a la corrosión. Uno de los procesos más utilizados es la formación de un recubrimiento de óxido, a partir de un procesamiento electroquímico [16], sin embargo, existen otras técnicas de protección como puede ser la galvanotecnia o el galvanizado, que consiste en la deposición de otro metal en la superficie del aluminio, no obstante, este trabajo no busca abordar otros procedimientos de protección de la superficie del aluminio.

El proceso por el cual es formada una capa de óxido sobre la superficie de una pieza de aluminio a partir de un método electroquímico es llamado "anodizado", el cual consiste en sumergir la pieza en un electrolito, a la cual se le suministra una corriente eléctrica, formando un recubrimiento de óxido.

El anodizado del aluminio, puede ser obtenido a partir de diferentes procesos, según la norma, “MIL-A8625F- revestimientos anódicos para aluminio y sus aleaciones”.

La norma MIL-A8625F establece que cuando se cambia el electrolito base, se cambian las condiciones de operación y por lo tanto el proceso de anodizado es diferente ^[50].

Así mismo, otros autores como Gabriela Baltierra y Adrián Moisés, establecen que el cambio del electrolito y las condiciones de operación lo vuelven un proceso diferente. Ellos afirman lo siguiente: “Se usan varios electrolitos para producir la oxidación del metal... aunque con diversas concentraciones que determinan procesos diferenciados” ^[8].

Antonio Zamora Jiménez, en su trabajo de tesis titulado “Protección superficial de aluminio mediante recubrimientos nanoestructurados”, desarrolló diferentes procesos para obtener el anodizado duro y blando los cuales presentan las siguientes diferencias ^[53].

El proceso de anodizado duro se obtiene de a partir del uso de un electrolito de ácido sulfúrico, a temperaturas muy bajas y tiempos prolongados de exposición obteniendo mejores propiedades, principalmente una mayor resistencia mecánica y a la corrosión ^[8,19].

Mientras que el proceso de anodizado blando, se realiza a temperaturas más altas en comparación con el proceso de anodizado en duro, por este motivo las propiedades mecánicas serán menores, así como su resistencia a la corrosión, sin embargo, el proceso de anodizado blando es el más utilizado ^[8,19].

La capa superficial se puede ver afectada por muchos factores, como puede ser la temperatura, la densidad de corriente, el tiempo en el que se lleva a cabo el anodizado, así como la concentración y el tipo de electrolito a utilizar, por lo anterior se debe realizar una correcta selección de la temperatura, densidad de corriente y tiempo, dependiendo de las propiedades que se buscan tener se seleccionara las condiciones adecuadas.

El recubrimiento formado por anodizado mejora las propiedades del aluminio, ya que puede aumentar ligeramente sus condiciones mecánicas, proporcionando una mayor resistencia a la abrasión aumentado su vida útil, además si se desea es posible dar un acabado mate o tipo espejo a las piezas y la posibilidad de teñir la superficie del aluminio mediante diferentes colorantes (orgánicos o inorgánicos).

Gracias al anodizado, permite dar una mayor protección al aluminio, por lo que grandes industrias se ven beneficiadas tales como la aeroespacial, la cual, gracias al poco peso extra en su fuselaje y su gran capacidad de protección, lo hacen uno de los procesos primordiales y con mayor atención. Otras industrias que se ven beneficiadas son la automotriz, electrónica, la alimenticia y química ya que al tener un acabado mate o tipo espejo proporciona la apariencia de limpieza además de ser muy seguros y no generan contaminantes que puedan poner en riesgo a la salud, permitiendo que sean muy comúnmente utilizados en la industria farmacéutica, una de las industrias más sensibles y cuidadosas.

Capítulo 1: Aluminio: usos, aleaciones y sus características (físicas, químicas y mecánicas)

En la actualidad el uso del aluminio es de lo más común, ya que es posible utilizarlo en decoración, en arquitectura, como en uso industrial, debido a que posee grandes propiedades mecánicas, cuando se forma la aleación de aluminio con otro metal, le proporciona mayor resistencia, dando como resultado mejores características mecánicas, además, cabe resaltar que el costo bajo, peso y resistencia a la corrosión, hoy es uno de los metales más solicitados.

1.1: Química del aluminio

El aluminio y en general todas las aleaciones del aluminio, presentan propiedades químicas formidables ya que presentan una gran resistencia a la corrosión, causadas, por ejemplo, factores ambientales o químicos.

La gran resistencia se debe que el aluminio puede formar una capa protectora, de forma sencilla, debido que la superficie del aluminio tiene una gran afinidad de formar óxido, tan solo con la presencia del oxígeno de la atmósfera.

Esta capa protectora permite al aluminio tener muchas mejores propiedades no solo químicas si no físicas, ofrece una gran resistencia al calor, y a su vez impide que se vea afectada por la combustión, que solo se funde y no arde en comparación a otros metales, tales como el cobre, magnesio o hierro.

Además, el aluminio, reacciona mínimamente, en comparación de otros metales, sin embargo, llega a tener reacciones importantes principalmente con la presencia del agua y el oxígeno.

1.2: Clasificación según sus propiedades físicas y mecánicas

Una de las maneras más simples en la que es posible realizar la clasificación del aluminio, es a partir de las características físicas y mecánicas, ya que cada aleación presenta diferentes características. Es de suma importancia, para el momento de hacer la selección del material, debido a partir de las distintas propiedades de las diferentes aleaciones.

Las principales características mecánicas y físicas que se buscan son las siguientes:

1.2.1: Conductividad térmica.

Es una unidad de medida la cual nos permite medir la velocidad a la cual se transmite el calor a lo largo de un material, así como su capacidad de transferirla a otro.

Cuando se habla de aleaciones y conductividad térmica, se ha observado que la presencia de elementos que conforman las aleaciones, favorecen la disminución de la conductividad térmica, es decir que el aluminio puro (serie 1XXX), es considerablemente un mejor conductor del calor, en comparación de una aleación, la cual tenga silicio (serie 4XXX), o como un tipo 2XXX o 3XXX, las cuales se conforman de cobre, la cual permite la formación de Al_2Cu ^[6,7], la información completa acerca de las series de aleaciones se explica más adelante en la tabla 2, del apartado 1.4.

1.2.2: Metalizado y ductilidad.

Esta propiedad proporciona una gran ventaja de que el aluminio sea formado con gran facilidad en alambres, láminas delegadas, hojas las cuales no se romperán a menos de que se aplique una gran fuerza, además de presentar una ductilidad baja, como se muestra en la tabla 1, sin importar el tipo de aleación que se esté utilizando, siendo aún menor en comparación a la del cobre, permitido que se pueda formar con mucha mayor facilidad tuberías láminas, cables, en comparación con el cobre.

Tabla 1 Modulo de elasticidad del aluminio [17]

Módulo de elasticidad	
Cobre	10 000 klb/Pig ²
Aluminio	70 klb/Pig ²

1.2.3: Conductividad eléctrica.

La conductividad eléctrica es la propiedad, que nos permite medir la cantidad de corriente eléctrica en un material, la cual se ve principalmente afectada por la estructura atómica, la composición del material y se puede observar en las aleaciones de la 8XXX, que son excelentes conductores eléctricos, sin embargo los defectos cristalinos, así como perturbaciones dentro de su estructura cristalina, afectan el movimiento de electrones, aumentando la resistencia, en consecuencia la reducción en la conductividad eléctrica.

Uno de los principales procesos que afecta la conductividad¹⁰, es cuando se somete a un tratamiento térmico.

1.2.4: Posibilidad de acabado

El aluminio tiene la particularidad de ser manejado, para poder obtener el acabado deseado, el cual puede ir desde un mate, hasta un brillante, a partir de un cepillado sobre su superficie o un proceso de granallado, inclusive la aplicación de tintes, pinturas, que lo hace un material realmente interesante para ser utilizado en obras de arte y decoración³⁶, debido a la enorme cantidad de colores existentes del que se puede teñir, además el acabado proporciona una protección adicional un claro ejemplo es utilizar el anodizado como un proceso decorativo y de protección.

1.2.5: Atoxicidad.

El aluminio es excelente para su uso no solo en la industria química, si no que gracias a que es un material atóxico es decir una vez tratado de manera correcta, no debe presentar un riesgo en la salud de las personas, por lo que es fácil de encontrar dentro de industrias, como son la industria alimentaria o la farmacéutica, ya que puede ser utilizado en empaques de alimentos o medicamentos, latas para conservar los alimentos o la construcción de utensilios de comida, para uso doméstico.

1.2.6: Reflectividad.

Una de las propiedades que presentan casi cualquier tipo de aleación de aluminio es la reflectividad, ya que las aleaciones poseen la capacidad de reflejar el espectro electromagnético, frecuencias de radio, luz infrarroja, así como el espectro visible, debido a que las aleaciones de aluminio poseen la capacidad de reflejar el 80% de la luz que recibe sobre su superficie, así como el 90% del calor que entra en contacto en la superficie reflejante.

Además de todas estas ventajas, el aluminio proporciona un excelente aspecto estético, por esto y más, es muy común ver que sea utilizado para evitar el paso de la luz, como radiación térmica, permitiendo que sea muy efectivo ser colocado en techos, diseño y construcción de radiadores, antenas parabólicas entre otro mucho uso que se pueda tener.

1.2.7: Reciclabilidad

Una de las ventajas en comparación con otro tipo de metales es la facilidad con la que puede ser reciclado, sin embargo es que al reciclar constantemente este material, se va degradando, principalmente se debe a la composición química de las aleaciones de aluminio, provocando que sus propiedades físicas y mecánicas sean afectadas, pero a pesar de esta pequeña desventaja, al reciclar genera un

gran ahorro, ya que es posible reducir hasta un 95% la energía utilizada, en comparación de cuando se produce a partir de uno extraído, por primera vez.

1.2.8: Antimagnético y anti-chispa.

El aluminio por lo general tiene la propiedad de ser para magnético, es decir que no se siente atraído por los imanes, lo cual es una gran ventaja si se desea utilizar en la industria de la electrónica, lo que permite que sea uno de los favoritos para ser utilizado en protección de antenas, así como componentes de computadoras, por ejemplo, en disco de almacenamiento, entre otros usos.

También el aluminio no produce chispa cuando es golpeado contra otro metal lo que permite que sea seguro cuando se desea utilizar para almacenar sustancias inflamables como puede ser tanque de algún gas inflamable.

1.3: Tipos de aleaciones

Cuando se habla de aleaciones, existen 2 principales tipos de aleaciones las cuales dependerán del tipo de proceso de fabricación:

1. Aleaciones de forja: Este tipo de aleaciones son no ferrosos, lo que hace extremadamente adecuados para los procesos de conformado en frío o caliente, además son los más adecuados para el formado de extracción, laminado o en alambre.

Dentro de los diferentes tipos de aleaciones, existen las que son térmicamente tratables y las no los son, las que son térmicamente no tratables son las que se trabajan en frío esto con el fin aumentar su resistencia, las cuales están conformadas ya sean de Al-Mg, Al-Mn y Al puro.

2. Aleaciones de fundición: este tipo de aleación el metal es fundido para obtener la forma deseada, y es de los más cómodos, que se utilizan para la alimentación en moldes, además por su método de empleo, proporciona una mayor resistencia a la corrosión.

1.4: Clasificación “norma AA (aluminium association)

En las aleaciones, se divide en grupos a partir del metal con el que se haya formado la aleación, esto a partir de la norma AA (aluminium association), la cual consiste en una serie de 4 números donde el primer dígito, identifica el tipo de aleación que se está utilizando y según la NMX-W-169-SCFI-2015^[40], es la forma de identificación en el país.

Este grupo cuenta con 9 tipos principales de aleaciones como se muestra en la tabla 2:

Tabla 2 Serie de aleaciones a partir de la NMX-W-169-SCFI-2015 [40]

Serie	Aleación principal
1XXX	Aluminio sin alea 99% de pureza
2XXX	Cobre
3XXX	Silicio con adición de cobre y/o magnesio
4XXX	Silicio
5XXX	Magnesio
6XXX	Serie no usuales
7XXX	Zinc
8XXX	Estaño
9XXX	Otros elementos

Serie 1XXX: Este tipo de serie se considera que es prácticamente aluminio puro ya que cuenta con una pureza mínima del 99%, entre sus características principales es que tienen una excelente resistencia a la corrosión, además de ser un excelente conductor del calor, gracias a sus propiedades térmicas, así como presentar una muy baja resistencia al flujo de la corriente, además es muy sencillo realizar trabajos de soldaduras con estos tipos de materiales y por otro lado las aleaciones 1XXX tienen la capacidad de ser anodizadas.

Las aleaciones 1XXX, son muy comúnmente utilizadas en la industria alimentaria, química y de criogenización, siendo una de las principales aleaciones 1050 y 1350, las cuales son posibles encontrar en barra o hilo.

Serie 2XXX: Cuando se utiliza este tipo de aleaciones es porque se busca obtener una gran resistencia mecánica, siendo muy cercana a la del hierro, sin embargo, las aleaciones de aluminio serie 2XXX es mucho más ligera y menos costosa.

Sin embargo, la serie 2XXX tiene varias desventajas, ya que presenta una baja resistencia a la corrosión y si además por sus propiedades es un mal candidato para realizar un proceso de anodizado, además de que al intentar soldar no se puede llevar a cabo con facilidad.

Las principales aleaciones utilizadas son 2011, 2030, las cuales se fabrican en forma de barras y tienen una gran resistencia mecánica debido a su contenido de plomo y su principal uso es en tornillería, barras, etc. Las aleaciones 2017, se usan en barras y chapas. Las 2014 y 2024 se usa cuando se requiere tener muy elevadas condiciones mecánicas, como en carrocerías de vehículos de uso rudo o alto impacto.

Serie 3XXX: Esta compuesta a partir de una aleación de manganeso y/o cobre, la cual presenta una mayor resistencia, siendo esta un 20%, en comparación a la serie 1XXX, sin embargo, no tiene mayor resistencia mecánica. La serie 3XXX presenta una excelente resistencia a la corrosión, siempre y cuando se le dé un tratamiento de anodizado y es una excelente opción cuando se busca soldar.

Por estos rasgos es una de las aleaciones favoritas a utilizar dentro del sector alimenticio, utilizándose en latas de bebidas o conservas, así como en el área de la construcción como pueden ser en tejados, recubrimiento de fachadas, entre otras aplicaciones y el principal motivo es que presentan una mayor resistencia mecánica en comparación al aluminio que se utiliza convencionalmente.

La serie 3XXX es posible encontrarse en forma de barras, tubería, láminas, entre otras.

Serie 4XXX: Consiste en una aleación de silicio, se encuentran también unidas con un porcentaje menor de manganeso, sin embargo la serie 4XXX tiene la característica de presentar una resistencia media-alta, además de tener una excelente resistencia a la corrosión, debido que son una de la aleaciones más óptimas para recibir un proceso de anodizado, cuando se necesita fundir este tipo de aleaciones presentaran en menor medida fisuras tras el enfriamiento y las aleaciones 4XXX permiten formar piezas complejas, con mayor facilidad durante el moldeo.

Por estas razones es muy común encontrar las aleaciones 4XXX, en el sector de la construcción y de la decoración, pudiendo encontrarlos en marcos de ventanas y puertas, además de que es un buen conductor eléctrico y es poco frecuente, encontrarlos en cables de electricidad.

Serie 5XXX: Principalmente se componen de aluminio y magnesio y son de las más destacadas debido a su alta resistencia a la corrosión y a su gran compatibilidad con el proceso de anodizado, gracias a estas características, presentan un excelente comportamiento en ambientes marinos, son muy buenas cuando se busca realizar soldaduras, además de ser un material con muy poca ductilidad, esto permite que sea utilizado en la construcción de aviones barcos, ferrocarriles, así como auto partes, además de tener la ventaja de ser un material de costo relativamente bajo.

Serie 6XXX: Aleación no ferrosa, es conformada a partir de una aleación de 2 metales, el silicio y el magnesio, es considerada una aleación especial y poco usual debido a que a la aleación se le agrega el siliciuro de magnesio (Mg_2Si), este es una compuesto inorgánico de color negro, el cual proporciona, mejores características que le permite recibir, tratamientos térmicos y tener una excelente resistencia a la corrosión, además permite ser usado en procesos de extrusión, proporcionado de una buena resistencia mecánica, como buenos rasgos para poder ser soldadas. Las aleaciones serie 6XXX son excelentes conductoras del calor y tiene una gran resistencia a altas temperaturas.

Es usada principalmente en ventanas, puertas, así como en estructuras que necesiten un alto índice de dureza, además se les utiliza en disipadores de calor.

Serie 7XXX: para que una aleación sea considerada de esta manera, deberá contener un porcentaje mínimo de zinc del 4%, esto le permite que tenga buenas propiedades mecánicas, considerándose como una de las mejores aleaciones, no son considerados como las mejores resistiendo la corrosión, pero dentro de este grupo existen aleaciones que son relativamente buenas para soportar un ataque corrosivo y que son fáciles de soldar, pero con una menor resistencia mecánica como lo es la aleación 7020. Mientras que aleaciones como del tipo 7075, presentan una mayor resistencia mecánica, a su vez pierden la propiedad de resistir ataques corrosivos y además no son de las más adecuadas, cuando se busca realizar un proceso de soldadura.

La serie 7XXX es utilizada en el sector aeronáutico, armamento militar, como en tornillería de alta resistencia, esto a su alta resistencia y ligereza.

Serie 8XXX: Es una aleación que se utiliza con frecuencia en la industria electrónica ya que, gracias a su contenido de estaño, es un excelente conductor eléctrico, pero presenta grandes desventajas, una de ellas que presenta una baja resistencia a la corrosión, pero gracias a que es un gran candidato para un proceso de anodizado, permite que aumente su resistencia a la corrosión considerablemente, además es un excelente conductor térmico, sin embargo el hecho de que esta contenga estaño no es recomendable usarse en temperaturas altas.

Este tipo de material es utilizado principalmente en cables o circuitos eléctricos ya que es mejor conductor eléctrico que si se utilizara el cobre.

Serie 9XXX: Es considerada una serie especial la cual está compuesta de una serie de compuestos diferentes sin ser uno en específico y lo cual la hace muy raro de utilizar a nivel industrial.

Sin embargo, suele contar principalmente de silicio, magnesio y como aleación secundaria hierro, cromo y litio.

1.5: Clasificación de aleaciones a partir de su comportamiento durante el proceso de anodizado.

El aluminio, además de clasificarlo, a partir su composición química, es posible hacerlo de otras maneras, ciertos tipos de aleaciones se comportan diferente durante el proceso de anodizado, según el tipo de aleación tendrá un diferente comportamiento en presencia del electrolito ácido que se esté utilizando, permitiendo clasificar de 3 maneras^{22, 43}.

1. Durante el proceso de oxidación anódica, las aleaciones se pueden disolver. Mientras se está llevando a cabo el proceso de anodizado, ciertas aleaciones se comienzan a disolver, esto debido al electrolito ácido, sobre la superficie, la formación de orificios microscópicos, reduciendo drásticamente su resistencia a la corrosión y a la abrasión.
Se presenta principalmente en aleaciones que contiene cobre, como puede ser las serie 2XXX, es debido a que, el ácido sulfúrico, lo disuelve formando sulfato de cobre que se queda en solución.
2. Las que no se ven afectada durante el proceso de anodizado.
Existen aleaciones, que debido a su composición química son prácticamente inertes a un anodizado con ácido, como son la compuestas con silicio que como sería la serie 6XXX, se debe a que el silicio dentro de esta, no se ve afectado dentro de su estructura química en presencia de ciertos ácidos, dando como resultado una película de color grisácea.
3. Aleaciones de aluminio que pueden ser oxidadas durante el proceso de anodizado.
Este tipo de aleaciones presentan una gran compactibilidad con el proceso de anodizado, sin embargo, para cada tipo de aleación serán las características que presenta el recubrimiento anódico y esto se verá principalmente reflejado en la tonalidad.
En aleaciones del tipo 3XXX o 5XXX, presentaran una tonalidad café oscuro esto se debe a la presencia de manganeso y esta a su vez reaccionara

químicamente dando como resultado dióxido de manganeso y su característico color.

Sin embargo, no solo observara el comportamiento en la tonalidad del recubrimiento, sino también en la textura, porosidad, resistencia a la corrosión o a su resistencia a la abrasión y esto depende totalmente del comportamiento de la aleación, por consiguiente, en el comportamiento de recubrimiento anódico.

1.6: Clasificación por el tipo de templado

Las propiedades mecánicas y físicas son de suma importancia para una aleación de aluminio, según sea las necesidades, por esto se utilizan técnicas, las cuales aumentan la resistencia a la ductilidad, entre otras propiedades, por esto se suele someter a un proceso de temple.

El templado es una técnica en la cual se somete una aleación de aluminio, al calentamiento o enfriamiento según el caso, consiguiendo aumentar la resistencia mecánica considerablemente.

El realizar un proceso de templado no debe ser tomado a la ligera, ya que al realizar un templado en caliente, la selección de temperatura es primordial, ya que la temperatura debe ser menor a la temperatura de fusión del material, además de no tener un control de la temperatura en todo momento y en la superficie del material existirá una gran variación en la dureza sobre el material.

Durante el proceso de selección de la temperatura a la cual se llevará a cabo el templado, es primordial conocer el tipo de aleación, debido a que no cuenta con un mismo punto de fusión y esto se debe principalmente su composición química, además de que se debe considerar las condiciones físicas y mecánicas deseadas.

Cuando se realiza un templado en frío, se hace inmediatamente salido del horno de fundición, se realiza sumergiendo en un baño de agua fría, la velocidad a la que se baja la temperatura es el factor de mayor importancia, ya que la velocidad del

templado define principalmente sus propiedades mecánicas y físicas, logrando afectar considerablemente su resistencia a la corrosión, tracción y tenacidad.

Debido a que cada tipo de templado tiene en si unas características, la Aluminium Association ^[4], clasificó según los diferentes tipos de templado, agrupándolos en una clasificación llamada Association Temper Designation System, la cual es mucho más amigable para comprender y lo hace clasificarlo por los tratamientos básicos primarios en el que se realiza el temple y se clasifica en 4 principales grupos.

F: Las propiedades adquiridas por el templado, son a partir del proceso de manufactura, que no proporcionan garantía sobre las propiedades mecánicas del aluminio.

D: Es uno los templados más suaves en las aleaciones ya que es recocido o recristalizado.

H: Corresponde a un proceso de deformación, se aplica a los productos que son altamente susceptibles a aumentar sus propiedades a través de un templado en frío. Esta clasificación, va acompañada por mínimo 2 dígitos, siendo el primer dígito la combinación de operaciones básicas, realizadas durante el proceso, mientras que el segundo dígito, nos da el nivel de dureza del material una vez relajado es procesamiento.

T: Aplica cuando se ha tratado térmicamente el material, siendo de poca importancia si se sometió a un proceso de endurecimiento por deformación. De la misma manera que la clasificación "H" va seguida por una serie de dígitos, la cual va de la numeración 2 a 10, se le asigna según sea la combinación de operaciones mínimas que se llevan a cabo durante el proceso de temple, siendo las más comunes.

T2: Solamente recocidos, esto aplica cuando el material no ha sido fundido.

T3: Tratados térmicamente, los cuales son candidatos a ser tratados en frío.

T4: Tratados térmicamente mediante un envejecimiento de forma natural, llegando a las condiciones de estabilidad necesarias.

T5: Se somete a un envejecimiento de manera artificial, posterior a su fabricación a temperaturas muy altas.

T6: El aluminio es sometido de a un tratamiento térmico y posterior será envejecido térmicamente.

1.7: Algunas aleaciones que son compatibles con el anodizado

Cuando se desea realizar un proceso de anodizado, existen aleaciones las cuales no son compatibles con este procedimiento, sin embargo, hay otras que con mucha facilidad es posible, como 1100, 6061, 6063, 6463, las cuales además son de las más comunes a utilizar ya sea en construcción y arquitectura, en el diseño y construcción de partes para transporte, objetos de uso cotidiano, como muebles, electrodomésticos, por mencionar algunas características.

1100: esta aleación es considerada un tipo puro, ya que posee 99% de Al como se ve en la tabla 3, por lo que no es posible que sea tratada térmicamente, sin embargo, presenta una excelente resistencia a la corrosión, así como alta conductividad térmica, además, en forma recosida es un material suave y muy dúctil, también es adecuado para ser doblado, se pueda estirar, entre otras características de la aleación.

Por esto es muy común que sea utilizada en la industria química y en la elaboración de alimentos, por su buena conductividad térmica es común que sea utilizada en intercambiadores de calor entre otros usos, como, piezas de corte, utensilios de cocina, trabajos en chapa.

Tabla 3 Composición de la aleación 1XXX [27,44]

Elemento	% presente
Al	99% (mínimo)
Cu	.12%

6061 y 6063: Las aleaciones 6062 y 6063 presentan características muy similares entre sí, sin embargo, no se tiene que confundir y pensar que son iguales ya que pueden presentar ligeras diferencias entre estas.

Estas aleaciones, presentan una resistencia media, comparando con el hierro teniendo como principales elementos aluminio, silicio, y magnesio, como se puede observar en la tabla 4, dando como resultado que sean utilizadas como materiales para arquitectura, debido a su buena resistencia mecánica, resistencia a la corrosión presentando un buen acabado pudiéndolo encontrar en ventanas, techos, marcos, entre otros.

Este tipo de material se puede someter a un proceso de templado obtenido alguna de las siguientes clasificaciones. T4 debido a que se envejece mediante el uso de una solución caliente y la T6 envejeciéndolo de manera artificial.

Tabla 4 Composición de aleacion 6063 y 6061 [27]

	6063	6061
Elemento	% Presente	% Presente
Si	0.2 ~ 0.6	0.40~0.8
Fe	0.0 ~ 0.35	0.7
Cu	0.0 ~ 0.1 1.0	0.15~0.40
Mn	0.0 ~ 0.1	0.15
Mg	0.45~ 0.9	0.8~1.2
Zn	0.0 ~ 0.1	0.25
Ti	0.0 ~ 0.1	0.15
Cr	0.1 max	0.04~0.35
Al	Balance	Balance

6043: Forma parte de la familia de las aleaciones de silicio-aluminio-magnesio, a partir de la composición mostrada en la tabla 5. Este tipo de material y solo es posible ser utilizado mediante la forma de extracción, para ser tratado con calor aumentando sus propiedades físicas y mecánicas siendo usado en la industria arquitectónica.

Tabla 5 Composicion del aluminio 6043 [27]

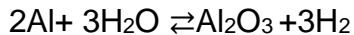
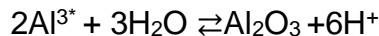
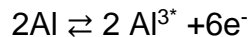
Elemento	% Presente
Si	97.9~99.4
Fe	0.15
Cu	0.2
Mn	0.05
Mg	0.45~0.9
Zn	0.05
Al	Balance

Capítulo 2: Anodizado

El proceso de anodizado de aluminio consiste en la formación de una capa de óxido de aluminio (Al_2O_3), sobre la superficie del material. La capa, ayuda a prevenir el proceso de corrosión.

Patricia Anillo Muños, en su trabajo de tesis nos explica que el anodizado, que consiste en una oxidación anódica, la cual se realiza partir de un sistema electroquímico, es decir que el aluminio tendrá la función de ánodo, mientras que se utilizará otro metal como cátodo, como el plomo, grafito, o platino la cual estará sumergido en algún electrolito ácido⁶.

La reacción que sucede en el proceso de anodizado consiste en que la corriente pasa por la solución de ácido sulfúrico, en donde se encuentran sumergidos el ánodo y en cátodo, en el ánodo se desprenderá el oxígeno dando como resultado una oxidación acelerada del aluminio, mientras que en el cátodo se dará el desprendimiento del hidrogeno, por la electrólisis del agua.



Las propiedades y la composición de la película protectora se ven afectada principalmente por la corriente que le sea suministrada, el tipo de electrolito que se utilice, temperatura del baño, densidad de corriente y el tiempo de anodizado.

Para los procesos de anodizado en el aluminio, se puede con 3 tipos de electrolitos:

- Ácido sulfúrico
- Ácido crómico
- Ácido oxálico

Sin embargo, el que comúnmente se utiliza a nivel industrial es el anodizado con ácido sulfúrico, dando como resultado películas porosas que permiten teñirlo de una manera más fácil, el aumento de su resistencia a la corrosión, y dando un grosor aproximado de entre 0.005 a 0.015 micras en la formación del óxido de aluminio.

Las características de la película se verán afectadas por las condiciones tales como la temperatura, la composición de la aleación de aluminio, tiempo de anodizado.

Para el proceso de anodizado mediante ácido sulfúrico es posible predecir a partir de las condiciones de densidad de corriente, el tiempo necesario para obtener el espesor de la película deseada mediante estos dos métodos empíricos. Según Ramón Lagos y Juan Camus en el artículo Anodizado y coloreado de obras de arte de aluminio y sus aleaciones utilizando ácido sulfúrico de baterías agotadas^[36] como se muestra en la siguiente ecuación:

$$t = g \left(\frac{1}{0.33} \right) \left(\frac{1}{dcc} \right)$$

t= tiempo de anodizado (min)

g=grosor de la película (micras)

dcc= densidad de corriente (A/dm²)

Regla de 720: Esta regla nos dice que por cada minuto aplicando una corriente de 720 amperios se produce 1 milésima de pulgada de espesor^[36].

El conocer el espesor de la película es de suma importancia ya que esta genera resistencia a la corrosión.

Durante el anodizado se forman dos capas diferentes como se puede observar en la figura 1, la capa barrera o interior, de un espesor de entre 0.1 y 0.33 micras la cual está en contacto directo con la superficie del metal y la capa exterior que la que se encuentra en contacto directo con el electrolito, La capa exterior tiene un espesor de entre 15 y 20 micras, sin embargo, en ocasiones, si se requiere se puede llegar a formar capas hasta de 250 a 300 micras según las necesidades.

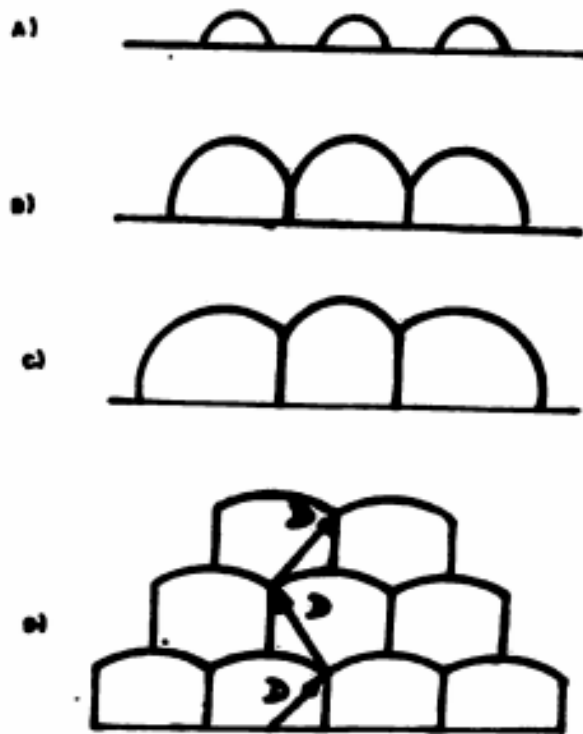


Figura 1 Formación de la capa anódica al paso de la corriente [43]

- Formación aislada de la capa anódica en diversos puntos de la superficie del aluminio.
- Formación de la capa.
- Obtención del máximo espesor de capa anódica.
- Disolución de la capa barrera por el electrolito y comienza la formación de la capa porosa.

2.1: Etapas del anodizado

En los procesos de anodizado se deben realizar una serie de etapas como se muestran en las figuras 2-4. Se considera que un proceso diferente cuando se utiliza un electrolito diferente, debido al cambio en las condiciones de operación.

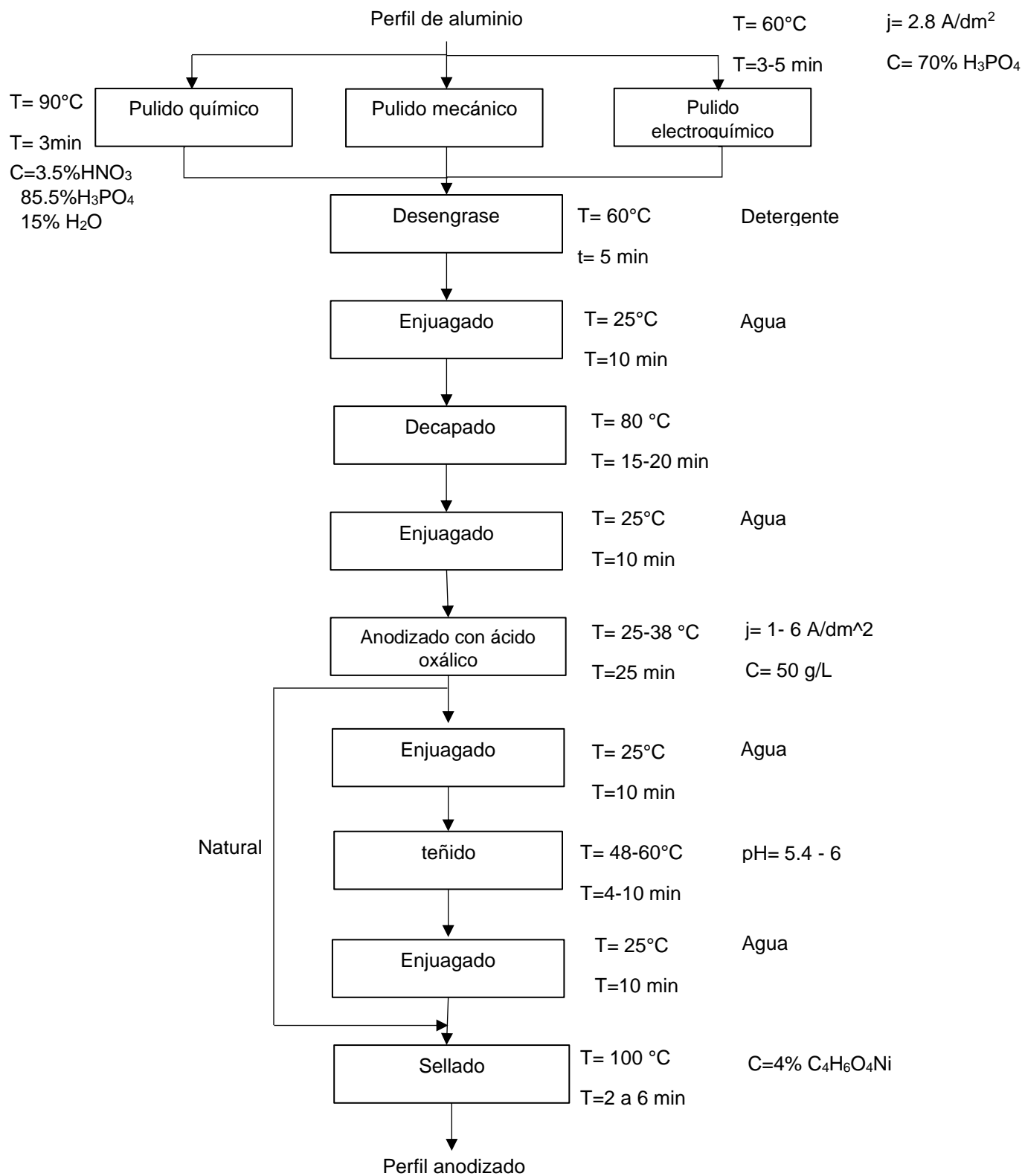


Figura 4 diagrama de flujo del anodizado con ácido oxálico

2.1.1: Pulido

El proceso consiste en desgastar el material con el fin de dar la superficie del metal lo más lisa posible o según la apariencia que uno desea buscar en el material.

Existen 3 tipos de pulidos, mecánico, químico, electroquímico, sin embargo, para este proceso solo se recomienda utilizar pulido mecánico o químico, esto dependerá de las necesidades, si uno busca un acabado que sea brillante, sin llegar a un tipo espejo, se recomienda el uso de un pulido mecánico. Si se busca obtener un pulido un tanto más opaco brillante entonces se recomienda un pulido químico y si se desea un tipo espejo se usará el pulido electroquímico.

En el pulido químico, se utiliza una solución de ácido fosfórico-nítrico, en concentraciones de 85.5% ácido fosfórico, ácido nítrico 3.5% y 15% agua a una temperatura de aproximadamente 90°C durante un tiempo de 30 s a 3 min.

Este tipo de pulido puede llegar a dar mayor resistencia a la corrosión.

Cuando se busca un acabado tipo espejo de muy alta calidad, el pulido electroquímico es la mejor opción, principalmente que el pulido electroquímico realiza una eliminación selectiva de partículas específicas en la superficie.

El pulido electroquímico se realiza a partir de un electrolito a base de ácido fosfórico en una concentración en 70% en peso y una temperatura de 60°C.

2.1.2: Desengrasado

En el proceso se busca eliminar cualquier rastro de alguna impureza que quedará a ver después del proceso del pulido mecánico o alguna traza de grasa, por esto se utilizan detergentes para realizar esta primera limpieza.

2.1.3: Enganchado

En el enganchado se colocan las piezas que van a recibir el tratamiento, se enganchan en pinzas o ganchos por donde va circular la corriente para el proceso.

El enganchado se puede realizar ante o después del paso de desengrasado.

2.1.3: Decapado

Mediante el baño y ácido crómico se busca eliminar cualquier impureza que pudiera quedar por ejemplo el óxido de aluminio formado antes del anodizado. El baño se realiza a una concentración de ácido de 5 g/L.

2.1.4: Matizado

Consiste en un proceso de pulido mucho más profundo, en cual se puede realizar de dos maneras:

Mecánico: El matizado mecánico se realiza mediante el uso de pulidores como puede ser el uso de esmeril abrasivos dando un acabado opaco sobre el aluminio.

Para el matizado mecánico se utiliza como material abrasivo el óxido de aluminio, el cual es considerado un mineral de extrema dureza y con alta resistencia al desgaste.

Carburo de silicio se fractura con facilidad cada partícula que se genera funciona como abrasivo.

Otra forma es mediante el uso de raspado el cual consiste en colocar el mineral abrasivo a una superficie, que por lo general es papel, tela, fibra, etc.

Otra manera de realizar el pulido es mediante el matizado químico el cual consiste en atacar al aluminio, sumergiendo la pieza de aluminio en una solución de sosa caustica con una concentración de 40 g/L a una temperatura de 40 a 50°C.

2.1.5: Formación de capa de óxido

La formación de el recubrimiento se lleva a cabo a partir de una reacción electroquímica, como se había mencionado, se forma una celda electroquímica, donde el aluminio que se desea anodizar tiene la función de ánodo, mientras que, el cátodo, puede ser de algún otro material. Por lo general el cátodo suele ser de

plomo, grafito, o cualquier otro metal o conductor que no tenga una reacción el electrolito o con el plomo lo que genere sub productos sobre la capa formada. En la figura 5 se observa un esquema de la celda de anodizado.

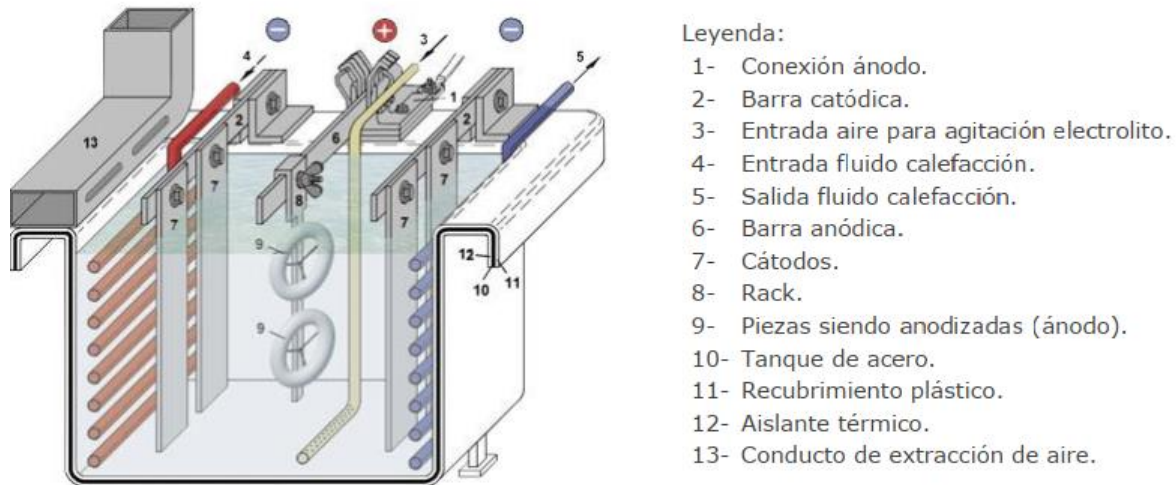


Figura 5 Diagrama de celda para anodizado [6]

Este paso es uno de los más importante en el proceso ya que este crea el recubrimiento, que le ofrece al material una mayor resistencia a la corrosión, además el recubrimiento permite que se le puedan dar acabados al material como el teñido ya que tiene una excelente capacidad para retener los colorantes, (siempre y cuando el poro sea el adecuado durante el proceso de la formación).

Los iones cargados negativamente (aniones), que consiste principalmente en oxígeno (O^{2-}), teniendo la particularidad de unirse químicamente con el aluminio, el cual se le desea formar el revestimiento, una vez formada, impide el flujo de corriente cuando este se haya secado el revestimiento.

Durante el crecimiento de la película de óxido, existe un límite en este ya que la capa de óxido dejara de crecer en el momento en el que el revestimiento formado, impida la conductividad, esto debido a que los poros formados sobre la capa de óxido, tiene la característica de que su abertura de los poros son mínimo, por lo tanto, disminuye el flujo de la corriente sobre la superficie del material.

Esto nos permite decir que mientras va aumentando el grosor de la película aumenta su resistencia eléctrica, por la velocidad de crecimiento del recubrimiento disminuye a medida que crece el recubrimiento.

Para el formado de la película existen aún más factores que puede afectar potencialmente en el crecimiento de la película, por ejemplo, si no se mantiene constante la velocidad de disolución la cual es causada por el electrolito, el crecimiento de la película se verá afectada ya que el crecimiento no será contante.

Otros factores que afectan potencialmente en el crecimiento de la película es el tipo de electrolito, ya que según sean las necesidades, será el electrolito a utilizar. La temperatura de trabajo es considerada una de las principales condiciones que afectan las condiciones de trabajo y por ende el crecimiento de este recubrimiento de óxido de aluminio.

Este tipo de recubrimiento, no solo protege contra la corrección y la abrasión, también permite que el material sea teñido, dando más resistencia, cuando se aplica color y ayuda a proteger el brillo del material otorgando la capacidad de tener aislamiento térmico y eléctrico, esto se debe que el material anodizado, obtiene una mayor dureza y resistencia.

Los recubrimientos anódicos se pueden clasificar a partir de sus características, y usos, como se muestra a continuación en unos ejemplos:

1. Anodizado decorativo: el anodizado decorativo es utilizado para dar un decorado sobre el material, es principalmente en piezas de obras artísticas, buscando obtener un acabado ya sea mate, brillante, etc. Además, el anodizado decorativo suele ser de mayor espesor, de entre 5 a 25 micras si no se desea teñir, mientras que, si se le va a colocar un tinte al material, se recomienda tener un espesor mayor, el cual ronda entre 15 - 30 micras.
2. Anodizado duro: el anodizado duro es un tipo de anodizado tiene la característica de que es mucho más duro en comparación con los otros tipos de anodizados, ya que deben contar con un espesor de entre 25 a 100 micras, que es ideal cuando se busca una mayor protección contra la

corrosión y contra el desgaste, sin embargo, este tipo de anodizado se debe realizar con otro tipo de condiciones, ya que el electrolito se debe encontrar a temperaturas muy bajas y se debe suministrar un voltaje muy alto.

3. Anodizado arquitectónico: este tipo de anodizado es utilizado principalmente en cancelería, cuenta con un espesor más delegado el cual va entre un espesor de 10 a 20 micras.

Cuando se realiza un anodizado, durante el proceso se generan 2 capas de partículas las cuales son:

1. Capa exterior: es la capa más gruesa que se forma en la parte exterior de la película, la cual es la más densa y dieléctrica, teniendo un espesor de entre 0.5 y 2 micras.
2. Capa interior o capa barrera: esta capa a diferencia de la capa exterior, el espesor se ve afectado debido al tipo de electrolito que está utilizando y además las condiciones de trabajo.

La capa barrera tiene la característica de ser dieléctrica, por lo que el espesor del recubrimiento se ve afectada directamente con el voltaje de formación y ese inversamente proporcional con la velocidad de disolución o, dicho de otra forma, la solubilidad del óxido en el electrolito.

Cuando la velocidad de disolución es muy alta, se genera una capa dieléctrica extremadamente fina, la cual tiene un grosor promedio de entre 0.03 a 0.05 micras.

Cuando la capa barrera llega a su máximo espesor, solamente permite el paso de corriente muy reducida y la intensidad tiene una variación conforme a la composición de las aleaciones del aluminio.

Para obtener las mejores propiedades en este tipo de capas, se logra a partir de un anodizado, que utiliza ácido sulfúrico a una temperatura de 20 °C, teniendo una concentración de 200 g/L.

2.1.6: Neutralizado

El neutralizado, busca eliminar cualquier rastro que haya podido quedar durante la etapa de la generación de la capa de oxidación, principalmente ácido que no hayan sido eliminados, después ser enjugados con agua y ser extraídos del baño ácido del anodizado.

Por esta razón se realiza un segundo lavado con una solución de bicarbonato de sodio al 2%, con el fin de no afectar el proceso de teñido o generar un daño al revestimiento de óxido de aluminio formado.

2.1.7: Teñido de la capa de óxido

Una vez formado el recubrimiento de óxido y si se desea teñir se deberá hacer antes de realizar el proceso para contar con la capacidad de adherencia a los colorantes y con más facilidad, por estas características, permite que las piezas de aluminio anodizado, obtengan aún más resistencia a la corrosión y al desgaste, esto debido a que la capa de colorante cumple la función, como si fuera una segunda capa protectora además de la formada por el óxido.

Cuando se desea colocar un colorante, las capas anódicas deben tener alta porosidad, permitiendo una mayor capacidad de absorción de los colorantes, buscando tener un teñido uniforme, además la capa anódica debe tener una alta resistencia a la abrasión y el teñirlo es posible que aumente esta capacidad sobre el material.

2.1.7.1: Proceso de teñido o coloración en recubrimientos de óxido de aluminio.

Cuando se termina el proceso de anodizado y se ha formado la capa de óxido, tiene la característica de ser porosa, permitiendo que sea altamente absorbente y que con mucha facilidad se pueda ensuciar, por este motivo el colocar un colorante, ayuda a que el impacto de la suciedad sea en menor medida.

Hay que recordar que los recubrimientos anódicos sobre el aluminio, están compuestos principalmente de Al_2O_3 y $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$, que al hidratarse el $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$, se llenan los espacios, lo que hace que sea mucho más complicado el teñido de estas.

Una vez que se haya terminado de teñir o si se desea conservar el color natural del material, este deberá pasar por un proceso de sellado.

Para poder llevar a cabo el proceso de teñido, esta capa debe cumplir con ciertas características mínimas:

1. El espesor de la película anodizado debe ser lo suficientemente gruesa y uniforme, permitiendo fijar de la mejor manera el tinte, un factor a considerar es la característica del tinte, ya que define el espesor del recubrimiento.
2. La película formada deberá ser lo suficientemente absorbente y dependiendo del tamaño y forma de los poros.
3. El color que se desea utilizar sea compatible con la película formada.
4. La película formada estar libre de impurezas, si se desea obtener con un color uniforme.

Estas características garantizan que el teñido será el deseado, sin embargo, se ha encontrado que el método más efectivo y que logra reunir todas estas características en la película formada, partir de uso del ácido sulfúrico como electrolito proporciona un buen espesor, la porosidad deseada, y el tono del color que se desea en el recubrimiento.

Además de todas estas características, la película formada con ácido sulfúrico no presenta tonalidad es decir la película es transparente, lo cual no sucede al realizar el proceso de anodizado con otro electrolito pues se tienen diferentes películas de tonos distintos como se menciona.

1. Ácido oxálico: proporciona una capa de tonalidad amarillenta y es muy costosa en comparación al ácido sulfúrico, lo que genera que no sea rentable a nivel industrial, pero el uso de ácido oxálico solo es recomendable cuando

se busca obtener un espesor muy grueso que puede llegar hasta las 50 micras.

2. En el caso del ácido crómico, forma capas con una totalidad grisease, a nivel económico, no son tan costoso en comparación del ácido oxálico, sin embargo, tiene otra desventaja, los recubrimientos formados, son extremadamente delgados, por lo que no se pueden teñir con facilidad y el teñido no es uniforme en comparación con el recubrimiento formado con ácido sulfúrico.

2.1.7.2: Tipos de colorantes y como aplicarlos.

Cuando se busca teñir un recubrimiento anódico, los colorantes se pueden clasificar en 2 grupos:

1. Colorantes orgánicos
2. Colorantes inorgánicos

Los colorantes orgánicos, están compuestos principalmente por sales orgánicas y minerales, estas pueden ser anilinas, sales de diazonio o complejos metálicos. Los colorantes orgánicos, generalmente se preparan en agua, preferentemente en agua destilada. Esta tiene la cualidad de ser bien absorbidas debido a un proceso de capilaridad, hasta el fondo del recubrimiento, sin embargo, la absorción se ve afectada si no se tiene un control en el pH de la solución del tinte.

Dentro de este tipo de colorantes existen 2 grupos:

1. Los colorantes que se adhieren físicamente sobre las superficies de la película de óxido.
2. Los colorantes que tienen una interacción química en la capa de óxido de aluminio

Sin embargo, los colorantes más recomendados son los inorgánicos ya que estos poseen la cualidad de ser aún mucho más resistentes en comparación de los tintes orgánicos principalmente son más resistentes a la temperatura, y a la corrosión, entre otros beneficios.

Entre los principales colorantes inorgánicos se utilizan sales, como pueden ser algunos sulfatos de diferentes metales según sea el color que se desea utilizar, por ejemplo:

1. Sulfato de estaño y níquel: proporciona un color tipo bronce.
2. Sales de cobre: rosados a negros
3. Sales de magnesio: dorados-oro

Los colorantes de tipo inorgánicos son los que se utilizan con mucha mayor frecuencia en estructuras arquitectónicas, o piezas que sean expuestas a condiciones climatológicas que puedan acelerar la degradación de la pieza.

2.1.7.3: Resistencia del teñido a los agentes atmosféricos

El teñido es una de las características más relevantes del proceso de anodizado y por esto es de suma importancia conocer como es el comportamiento de teñido, a condiciones ambientes como pueden ser cambios bruscos de temperatura, lluvia, calor, así como efecto de la luz del sol.

Para ello se exponen muestras anodizadas a los agentes atmosféricos, comprobando su resistencia ante estos a través del tiempo. El procedimiento que se sugiere es exponer a condiciones extremas unas piezas anodizadas y teñidas durante un periodo mínimo de un año permitiendo que se pueda comprobar la estabilidad, ante los agentes exteriores, lo más óptimo será una pérdida de color menor a un 3%, dando por hecho que el teñido se hizo de manera correcta.

2.1.8: Sellado de la capa de óxido

Una de las principales causas por el cual los recubrimientos pierden la capacidad de absorción, es debido a que la capa de óxido formado se hidrata, lo que genera que los poros formados, sean llenados por cristales de $Al_2O_3 \cdot H_2O$ y a su vez aumenta la elasticidad del recubrimiento.

Para evitar que suceda esto se debe sellar la capa de óxido, generalmente se utiliza una solución de sales de níquel la cual debe de estar a una temperatura de ebullición, para que el sellado sea uniforme en todo el recubrimiento.

Sin embargo, además del sellado con sales de níquel, existe un sellado, utilizando sales fluoradas las cuales producen el mismo resultado de sellado, que el acetato de níquel, sin embargo, las sales de acetato de níquel pueden sellar el recubrimiento anódico, a temperatura ambiente por lo cual es mucho más sencillo y práctico al momento de realizar el sellado.

Otro tipo de sales que se utiliza para realizar el sellado de los poros es el acetato de plomo, sin embargo, este tipo de sales es muy poco usada debido a que son muy caras, además de producir residuos que son muy difíciles de manejar debido a la presencia de metales pesados.

El sellado de la capa anódica se da en dos pasos fundamentales:

1. Sellado de la capa anódica
2. Hidratación de la capa anódica

Cuando se somete la pieza con la capa anódica formada a la solución de sellado el cual contiene sales, comienza un proceso de difuminación dentro de los poros, en donde las sales quedan dentro del poro y el agua se evapora, dando como resultado un sello estanco en el poro, evitando que se degrade el anodizado y que haya efecto de la corrosión, así como se evita que se ensucie la superficie de partículas extrañas.

Además de el sellado con sales existe otra forma de sellar la capa anódica mediante el uso del agua, esta técnica se le conoce por sellado por hidratación la cual consiste en introducir la pieza aun con el poro abierto, en agua desmineralizada, esto provocara que se hidrate la película, aumentando el volumen de esta, dando como resultado que se sella herméticamente debido a la formación de $Al_2O_3 \cdot H_2O$. Sin embargo, este tipo de sellado no es muy confiable por lo que se recomienda el sellado mediante el uso de sales.

Capítulo 3 Condiciones de operación

Durante los procesos de anodizado se busca tener los mejores resultados, en cuanto a calidad del recubrimiento de oxido, esto es posible manteniendo una serie de condiciones durante cada etapa del proceso. Estas etapas se muestran a continuación en la figura 6. Así como la correcta selección de proceso de anodizado a partir del electrolito.

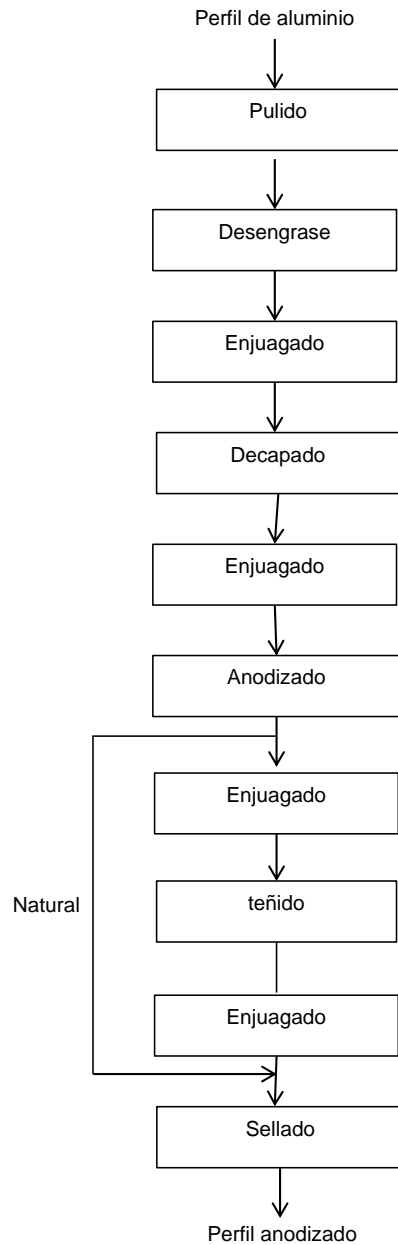


Figura 6 Diagrama de proceso de anodizado

Las condiciones que con mayor frecuencia provocan variaciones en el resultado final son las siguientes:

1. Tiempo
2. Concentración
3. Tensión
4. Temperatura

3.1: Tipos de electrolitos

Cuando se busca obtener un recubrimiento protector, una de las maneras más sencillas, eficaces y eficientes es mediante un proceso de anodizado. En la industria del anodizado existen 4 tipos diferentes de electrolitos para llevar a cabo el anodizado de aluminio, la elección del electrolito a utilizar dependerá de las características que se desea obtener, así como el giro industrial.

Principalmente son utilizados el ácido crómico, ácido oxálico, ácido fosfórico y ácido sulfúrico, siendo el último el más concurrido en el sector metalúrgico debido a su bajo costo, facilidad de manejo y las características que proporciona el recubrimiento formado.

3.1.1 Anodizado mediante ácido crómico

El ácido crómico es uno de los electrolitos utilizados para un proceso de anodizado. Este tipo de anodizado genera un recubrimiento muy delgado y produce una capa de color blanquizca y opaca, sin embargo, el anodizado con ácido crómico, también ofrece ventajas, como una mayor resistencia al desgaste en comparación a una formada por ácido sulfúrico, además de tener mayor ductilidad y mayor resistencia al desgaste. El uso de ácido crómico es mucho menos agresivo en el metal, si se compara con el ácido sulfúrico, por todas esas condiciones este tipo de electrolito es utilizado en piezas de la industria aeronáutica.

A pesar de poseer grandes ventajas, presenta otras grandes desventajas, ya que el uso de ácido crómico, es altamente tóxico, poniendo en riesgo a la salud, principalmente se debe a que, durante el proceso de anodizado, hay presencia de

cromo VI, el cual la agencia europea de sustancias y mezclas químicas (ECHA) y la agencia de protección ambiental de estados unidos (EPA) es considerado altamente cancerígeno.

Otra desventaja es que el uso de ácido crómico, es altamente costoso en comparación de un anodizado con ácido sulfúrico, además que, si se desea teñir, este tipo de recubrimientos no son uniformes, por lo cual el colocar un color se debe realizar mediante otra técnica.

Si se desea realizar un anodizado a partir de ácido crómico, se deberán cumplir con las condiciones de la tabla 6 para obtener un recubrimiento de calidad y uniforme.

Tabla 6 Condiciones de operación para electrolito soporte de ácido crómico [6,43]

Temperatura	38-42 °C
Voltaje	Rampa de 0 a 40 V
Concentración del electrolito	30-100 g/L
Grosor	2-5 μm
Tiempo	40 min
Densidad de corriente	0.3-0.4 A/dm ²

3.1.2 Ácido oxálico

El ácido oxálico al igual que el ácido crómico, es un electrolito poco ocupado dentro de plantas de anodizado debido a que el tipo de recubrimiento que produce, presenta ciertas desventajas, por ejemplo, el electrolito forma capas de color amarillento, además de que si se desea teñir es un proceso muy complicado. La mayor desventaja es que el recubrimiento con ácido oxálico formado es muy poroso, esto genera que no sea bueno para prevenir la corrosión, esto se debe a que permite el paso de agentes corrosivos.

Sin embargo, los recubrimientos formados por ácido oxálico poseen ventajas, este permite que se realice con corriente alterna o continua. El ácido oxálico como

electrolito se utiliza cuando se busca obtener un recubrimiento de mayor espesor, duros, compactos y con un gran poder aislante, logrando llegar hasta 50 μm .

Las condiciones óptimas para el proceso de anodizada con ácido oxálico, se deberá operar en las condiciones indicadas en la tabla 7.

Tabla 7 Condiciones de operación con electrolito de ácido oxalico [6, 43]

Temperatura	25 – 38 °C
Voltaje	25 – 30 V
Concentración del electrolito	50 g/L
Grosor	25 -50 μm
Tiempo	25 min
Densidad de corriente	1 – 6 A/dm ²

3.1.3 Anodizado con ácido sulfúrico

El uso del ácido sulfúrico es uno de los electrolitos más utilizados dentro de la industria, se debe principalmente al bajo costo, en comparación de otro tipo de electrolitos, además que el electrolito de ácido sulfúrico proporciona al recubrimiento formado, características que lo hacen ser el favorito.

Durante el proceso de anodizado, las condiciones de operación deben ser controladas de manera correcta, si se desea obtener un recubrimiento de calidad. Por lo cual deberá cumplir las condiciones de la tabla 8.

Tabla 8 Condiciones de operación mediante ácido sulfurico [6,43]

Temperatura	20-25 °C
Voltaje	18-24 V
Concentración del electrolito	20%
Grosor	15-20 μm
Tiempo	40 a 60 min
Densidad de corriente	2.5 -3 A/dm ²

Durante el proceso de anodizado, se forman dos diferentes capas, la primera denominada, capa barrera la cual tiene un espesor aproximadamente de entre 0.01 a 0.03 μm , esta se encuentra en contacto directo con la superficie del material.

La segunda capa tiene un grosor mucho mayor la cual va entre 15 a 20 μm , sin embargo, mediante el duro anodizado es posible lograr alcanzar 250 a 300 μm . No obstante, la formación de la misma dependerá principalmente de la velocidad de disolución de la película, como de la densidad de corriente y la composición química de la aleación. Si existe presencia de cobre, el ácido sulfúrico disuelve el cobre, impidiendo un correcto anodizado.

Una de las grandes ventajas que ofrece este tipo de anodizado, por ejemplo, es que el anodizado formado proporciona un recubrimiento transparente, lo que hace que sea una capa estética, permite ser teñida con una gran gama de colores, además de proveer una moderada resistencia al desgaste y una gran resistencia a la corrosión.

Sin embargo, este tratamiento no es recomendado en el uso de la industria aeronáutica, principalmente por la baja resistencia a la fatiga y la mala adherencia a la pintura que se utiliza en el sector. Afortunadamente, se han encontrado variantes a partir del electrolito soporte de ácido sulfúrico. Se ha observado que, agregando ácido tartárico, se puede llegar a obtener resultados muy similares a los obtenidos con ácido crómico, esto es de suma importancia para la industria aeronáutica debido a que logra obtener los mismos acabados a menor costo y mayor seguridad para el operador.

Cuando se usa el ácido tartárico se observa cómo se genera un descenso de la conductividad, además este afecta considerablemente la formación del recubrimiento, sin embargo, hasta el momento no es posible el saber por qué sucede este fenómeno.

Al momento de realizar el anodizado de esta manera las condiciones de operación cambian, sin embargo, el cambio que se realiza es mínimo, pero si se desea obtener un recubrimiento de alta calidad se debe cumplir con las condiciones de la tabla 9.

Tabla 9 Condiciones de operación mediante ácido sulfurico y ácido taratarico. [6]

Temperatura	36-38 °C
Voltaje	13-15 V
Concentración del electrolito	H ₂ SO ₄ 30-50% C ₄ H ₆ O ₆ 70-90%
Tiempo	24-26 min
Densidad de corriente	0.5 - 1 A/dm ²

Cuando se busca obtener el mejor electrolito que ofrezca costo-beneficios, en comparación a los 3 electrolitos mencionados (Crómico, Oxálico y Sulfúrico), el que ofrece mayores virtudes, es el uso del ácido sulfúrico, este entre sus principales ventajas es el costo ya que este, es económico además de que su manejo es mucho más seguro, debido que es mucho menos toxico, reduciendo riesgos importantes a la salud.

Así mismo el recubrimiento formado, es uno de los más fáciles de teñir de manera uniforme, así como un fácil sellado con acetato de níquel, ofreciendo uno de las mejores protecciones contra la corrosión. Una ventaja importante, si se busca obtener propiedades muy similares a un anodizado a partir de ácido crómico, un anodizado con ácido sulfúrico y ácido tartárico, permitiendo obtener propiedades prácticamente idénticas.

3.1.4 Anodizado de capa dura.

El anodizado de capa adura, también conocido como duranodizado, es un procesamiento es utilizado cuando se busca obtener recubrimientos de mucho mayor espesor, el cual ronda entre un espesor de 125 a 250 μm y a su vez obtener mucha mayor resistencia al desgaste y al calor en comparación de un anodizado de manera tradicional.

Se logra mediante la inmersión en ácido sulfúrico a una temperatura aproximadamente entre -50 °C, una agitación constante mediante aire a presión, por un tiempo entre 40 a 90 min, la concentración de ácido deberá ser entre un 10 a 15% y una densidad de corriente 3 A/dm², el voltaje utilizado se debe realizar en

rampa, comenzando con una tensión de 10V y se debe llegar hasta un voltaje entre los 80 a 100V.

La disminución drástica en la temperatura permite que disminuya la velocidad de disolución.

El uso del anodizado de capa dura es posible utilizar en la gran mayoría de aleaciones de aluminio, sin embargo, no se puede realizar en aleaciones que contengan cobre debido a que este metal se logra disolver en presencia de ácido sulfúrico.

El anodizado de capa dura también conocido como duranodizado se recomienda en piezas las cuales no tendrán choques térmicos importantes, esto se debe, a que al realizar un choque térmico en el material pierde flexibilidad, principalmente se debe a la capa formada es poco flexible y los cambios de temperatura podría quebrar la capa debido a la dilatación.

El duranodizado le brinda mucha mejores o nuevas capacidades al material, por ejemplo, genera una alta resistencia eléctrica, esto se debe principalmente a que la alúmina es un excelente aislante eléctrico, aun mayor que la porcelana, sin embargo, el aislamiento eléctrico se puede ver afectado principalmente por las impurezas que pueda presentar el material. Además, es excelente protegiendo de ataques químicos o de corrosión, pero el tamaño del poro, ya que, si el poro está muy abierto la resistencia eléctrica, como la resistencia a ataques químicos o de corrosión, se verán altamente afectados, dando muy poca protección al material

Otra de las ventajas que presenta, es que el anodizado duro es altamente poroso, en la parte exterior del recubrimiento, permitiendo realizar un teñido de manera uniforme y permitiendo hacer un sellado correcto con acetato de níquel.

3.2 Factores que influyen en la operación

Durante los procesos de anodizado, debe mantener el control estricto en las variables ya que de no tenerlo puede verse afectadas la morfología del recubrimiento de óxido, provocando que los poros presenten diámetros muy pequeños o muy

grandes y no existirá un ordenamiento de los poros. Otra propiedad que se ve afectada es el espesor del recubrimiento no sea el adecuado, provocando que el recubrimiento, no cuente con las características mínimas necesarias que se desean además de que será quebradizo, con malas propiedades físicas, mecánicas y no cumplir con sus propiedades protectoras a ataques químicos y corrosivos haciendo que se considere un recubrimiento de baja calidad.

Existen múltiples factores que pueden afectar el proceso de anodizado, que pueden venir de cualquier lado, las cuales no se pueden prevenir ni corregir como puede ser que la aleación de aluminio presente una gran cantidad de impurezas y afectar considerablemente el proceso. Sin embargo, solo se hablará de aquellas en las que se implique directamente en el proceso y que además existe una posibilidad de poder modificar de una manera sencilla y rápida por el operador. Las principales y las que presentan mucha mayor fluctuación en el proceso son la temperatura, concentración, tiempo, densidad de corriente, tensión, entre otros factores.

3.2.1 Tiempo

En los procesos de anodizado el tiempo es un factor muy importante, ya que afecta principalmente el espesor de recubrimiento, debido a que, si no se deja el tiempo suficiente el espesor de la capa protectora, será muy pequeño, en cambio si deja por más tiempo del necesario llegara un punto donde dejara de crecer y este comenzara a disminuir de tamaño, este fenómeno es conocido como disolución del electrolito.

Otra desventaja que se presenta cuando se deja por tiempo prolongados, es que la pieza pierde su brillo natural esto se debe principalmente, durante el tiempo extra, existe un contacto excesivo con el electrolito provocando que se comience un ataque químico sobre las aleaciones, y que se vuelvan opacas dando un mal aspecto a momento de realizar el teñido y al resultado final.

Como se observa el tiempo es un factor muy importante a tomar en cuenta, en todo momento durante el proceso de anodizado, ya que la manipulación del tiempo se debe realizar a partir de la concentración del electrolito si es alta este permanecerá

poco tiempo en la tina de anodizado, al contrario, si la concentración es muy baja este permanecerá por periodos más largos de tiempos.

De igual manera el tiempo nos permite conocer la etapa en la que se encuentra el proceso, a partir de otra variable de control, la tensión, debido a que durante el proceso existe variaciones controladas en el voltaje lo que permite definir en qué punto se encuentra. El comportamiento del proceso de anodizado se divide en 3 principales zonas como se muestra en la figura 7

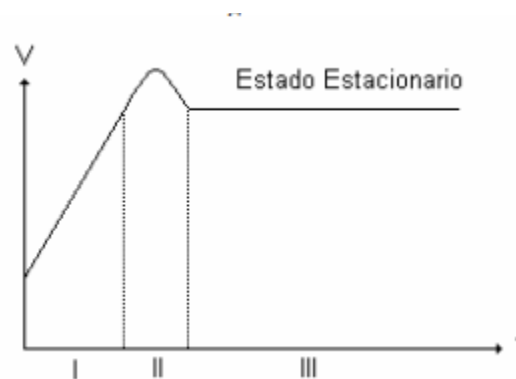


Figura 7 Comportamiento del voltaje VS tiempo de anodizado [51]

Zona I corresponde al momento de la formación de la capa barrera, esta se encuentra en contacto directo con el material, siendo capa la más delgada.

Zona II en este punto es cuando la formación de la capa porosa, corresponde a la capa de mayor espesor, siendo la más importante ya que la capa se encuentra en el exterior siendo la que brinda la mayor protección principalmente contra la corrosión y abrasión además de mejorar las propiedades mecánicas, aumentando la dureza.

Zona III es el momento que se da por terminado el proceso de anodizado, es decir deja de crecer el recubrimiento, siendo su máximo espesor y el momento en que se debe detener el proceso para no comenzar a perder espesor en el recubrimiento.

3.2.2 Concentración

Durante cualquier proceso a nivel industrial siempre se busca mantener el proceso, con la menor fluctuación y los procesos de anodizado no son la excepción. Si se

busca tener un recubrimiento uniforme, la concentración es una variable de las más importantes, debido a que la concentración en el electrolito presenta una de las mayores variaciones durante todo el proceso, se debe principalmente a que el electrolito entra en contacto con alguna impureza que se pueda encontrar en las aleaciones, dando inicio a una serie de relaciones químicas, provocando la disminución de la concentración del electrolito. Una de las más comunes es la presencia de cobre, el cual al entrar en contacto con el ácido sulfúrico forma sulfato de cobre, provocando una reducción de la concentración de ácido, así como contaminar el electrolito.

Una de las consecuencias de contar con una menor concentración de ácido, provoca que el recubrimiento formado, tenga un espesor muy delgado, como una baja porosidad, afectando principalmente a las propiedades físicas y mecánicas del recubrimiento y de la pieza, además la resistencia a ataques químicos que se busca obtener. Todos estos factores dan como resultado un recubrimiento de baja calidad, generando que el proceso sea menos eficiente y mucho más complejo, y que el teñido sea complicado incluso imposible de realizar.

Sin embargo, el tener concentraciones altas también provoca otro tipo de complicaciones, ya que una se forman recubrimientos de mayor espesor, dureza y un gran número de poro con diámetros superiores, provocando una mayor facilidad a un ataque de corrosión, debido a que permite una alta exposición a los agentes ambientales.

Por lo que cuando se va realizar el proceso, se debe de mantener la concentración del 20% de ácido sulfúrico durante todo el proceso.

Además de afectar las características mencionadas, la rugosidad se ve afectada, ya que, si se tiene una baja concentración en el electrolito, la rugosidad se verá disminuida, esto porque el ataque del ácido sulfúrico será mucho más lento generando que el ataque químico sea mucho más lento, así como el crecimiento del recubrimiento.

La formación de poros es parte importante a considerar cuando se habla de anodizado, ya que una de sus funciones es ayudar a que se fije de manera correcta el tinte al momento del teñido, sin embargo cuando existe una baja concentración de ácido sulfúrico en el electrolito, afecta considerablemente la formación de poros, porque al existir menos moléculas de H_2SO_4 , la posibilidad de colisiones sobre la superficie, es menor, provocando que haya menor número de poros, de forma contraria si existe una concentración muy alta, existirá mayor número de poros mayor número de colisiones esto se puede explicar de la siguiente manera:

“A menor número de colisiones de moléculas de H_2SO_4 , sobre la superficie, menor ser el número de poros formado y a mayor la contracción mayor porosidad”.

3.2.3 Tensión

La tensión, mejor conocida como voltaje, es la energía que se le suministra a nuestro sistema y es uno de los factores involucrados en el crecimiento del recubrimiento, ya que con él es posible definir o establecer el espesor del recubrimiento, sin embargo, no solo afecta el recubrimiento, también su morfología de la capa, como el tamaño del poro y la distancia que existe entre ellos.

Cabe resaltar que la tensión se encuentra en función de la densidad de corriente y a su vez se verá afectada por la conductividad del electrolito, con base a esto se tendrá una correcta selección del voltaje, si se usan tensiones altas esta aumentará el tamaño del recubrimiento hasta un punto máximo, dando como resultado que el recubrimiento será mucho más poroso y con un diámetro muy grande. Como consecuencia es que los poros no se encontrarán ordenados, generando que la resistencia mecánica y física sean menores.

El ordenamiento de los poros es un punto clave en la resistencia física y mecánica, por lo que se ha visto que, si suministran voltajes altos, en el rango de 60 a 90 V, no habrá un ordenamiento, mientras que, en voltajes menores a los 40V, el

ordenamiento de los poros ira mejorando llegando hasta voltajes menores a 25V donde existe el mayor ordenamiento de los poros.

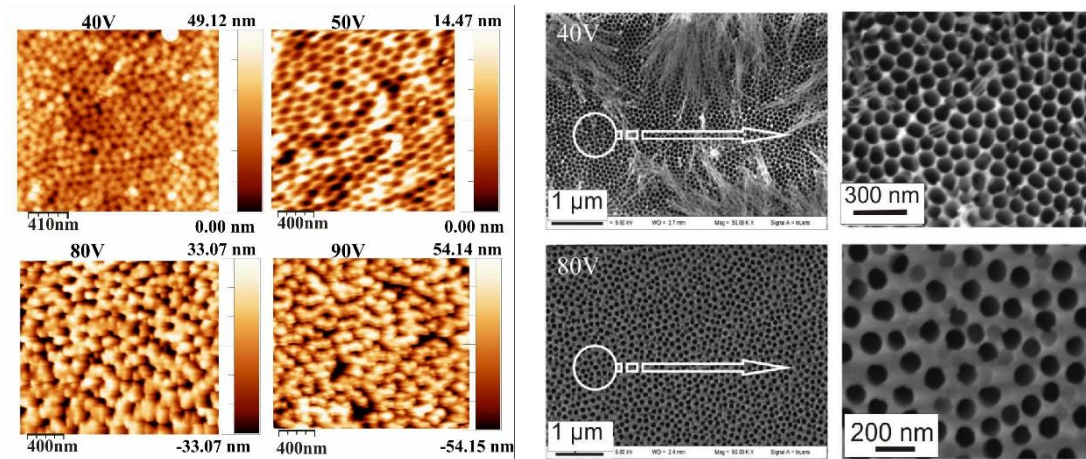


Figura 8 Ordenamiento de los poros a diferentes voltajes [18]

Como se puede observar en la figura 8, el cambio de tensiones, influye fuertemente, en la estructura del recubrimiento, como podemos ver en las imágenes la separación entre los poros no es uniforme cuando se aplica voltajes altos, en cambio cuando el voltaje es bajo se ve, que existe un orden en la estructura, los diámetros del poro son menores, en comparación con los que se formaron el voltaje alto, por lo que el recubrimiento presenta mejor calidad a voltajes bajos.

3.2.4 Temperatura

Cuando se busca tener un buen recubrimiento la temperatura del electrolito, no se debe perder de vista ya que la temperatura deberá ser cuidada en todo momento, durante el proceso de anodizado, ya que el espesor y la porosidad, son los más afectados, por esta razón se recomienda que la temperatura este en un rango de entre 20 y 25 °C, para obtener el mayor éxito y calidad posible.

Además, se ha observado que cuando las temperaturas en el electrolito son altas, el recubrimiento se comienza a fragmentar y cristalizar, presentando una alta presencia de esfuerzos residuales, reduciendo la rugosidad, debido a la alta disolución del electrolito,

A su vez la porosidad es afectada considerablemente, debido al aumento de la solubilidad de la concentración, así como el aumento en la energía cinética de las moléculas, dando un aumento en los poros, dando como resultado un cambio poco significativo en las propiedades mecánicas.

Cuando se trabaja con temperaturas bajas, se favorece el recubrimiento, ya que permite que este crezca de una manera más uniforme, dando como resultado superficies con menor porosidad.

Capítulo 4: Equipos de operación

Cuando se busca hacer un correcto anodizado, realizar una buena selección de equipos es primordial, ya que principalmente se debe considerar el alcance que se tendrá la planta, es decir la capacidad, el tamaño de los perfiles, el electrolito, sin embargo, en general casi todas las plantas de anodizado están compuestas por una serie de equipos principales.

4.1: Clasificación de plantas de anodizado

Cuando se habla de la clasificación de plantas de anodizado, hace referencia principalmente, en función al tamaño de los perfiles y piezas que es capaz de procesar, clasificándose en 3 diferentes tipos.

1. Una planta grande es considerada cuando es capaz de anodizar perfiles que tengan longitudes mayores o iguales a los 6.10 metros de largo.
2. Una planta de capacidad media, es aquella que tiene la capacidad de anodizar perfiles de hasta 3.5 metros de largo.
3. Una planta pequeña es aquella donde su capacidad máxima de procesar perfiles de 1.50m, además de piezas pequeñas, como son las de decoración, cancelería de tamaño pequeño, utensilios de cocina, entre otras.

Las plantas grandes y medianas cuentan con grandes infraestructuras y producen en masa, mientras que las pequeñas, son más artesanales, producen pocas piezas.

4.2: Equipos de pulido

Cuando se busca realizar un anodizado de calidad y de una manera correcta se debe llevar a cabo un proceso de pulido y decapado. Existen 3 formas de hacer el pulido de las superficies aluminio, de pulido mecánico, químico o electroquímico, sin embargo, el más común es el uso de un pulido mecánico, principalmente a que no produce residuos químicos que sean difíciles de tratar o desechar.

4.2.1: Pulido mecánico

Cuando se busca seleccionar un equipo de pulido, existen muchas opciones y variantes, sin embargo, todos los pulidores, se basan en principio fundamental, que consiste en una mesa, la cual mueve las piezas de aluminio, sobre esta, mediante una serie de ruedas de pulido, con ayuda de un motor, las ruedas de pulido en su superficie cuentan con un agente de pulido y/o un agente abrasivo, como en la figura 9.

A pesar del tamaño de planta de anodizado debe cumplir y obtener un buen pulido y decapado, se deberá seleccionar un equipo, a partir de las necesidades, como se observa en la tabla 10.

Tabla 10 Especificaciones de equipos [11]

	Ancho	Largo	Alto
Tamaño real	2000 mm	8000 mm	2500 mm
Tamaño de procesamiento efectivo	600 mm	6000 mm	200 mm
Longitud total de carril	13000 mm		
Motor de rueda de pulido	18.5 KW 2 conjuntos		
Velocidad de pulido	3-15 m/min		



Figura 9 Equipo de pulido mecánico [11]

Sin embargo, plantas pequeñas o cuando es necesario un pulido muy exhaustivo en piezas pequeñas, se suele utilizar las pulidoras individuales, permitiendo corregir de mejor manera pequeños daños, que no es posible con otro tipo de equipos.

En las pulidoras individuales existen básicamente 2 tipos a partir del giro de los rodillos:

1. Pulidoras rotatorias: El giro de los rodillos pulidores gira sobre su propio eje como se puede ver la Figura 10.
2. Pulidoras de doble acción: No solo realiza rotaciones sobre su propio eje, además oscila, dando como resultado orbitas elípticas.

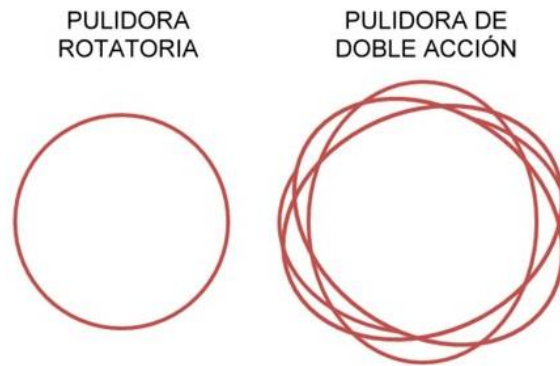


Figura 10 Tipo de giro [11]

4.2.1.1: Componentes y agentes abrasivos

Cuando se realiza la operación de decapado existe una gran variedad de opciones para llevarlo acabado, por ejemplo, el uso de un esmeril que contiene un agente abrasivo, esto es una serie de pequeñas partículas, la cual cada partícula es considerada un buril, estas partículas, se constituyen principalmente, por 2 diferentes minerales el óxido de aluminio o carburo de silicio.

El óxido de aluminio es un material que presenta una gran dureza, y su estructura cristalina presenta un gran número de aristas, por este motivo permite que sea un excelente agente abrasivo, además este mineral presenta una gran ventaja, ya que, si se utiliza de manera adecuada, es posible reutilizarlo entre 10 y 40 veces.

El óxido de aluminio, es un mineral que se encuentra de forma cristalina, el cual se realiza sintéticamente a partir de la bauxita. El óxido de aluminio es posible clasificarlo a partir de su nivel de pureza, por esa razón existen 2 principales tipos, que pueden ser identificados con facilidad, debido a la tonalidad que presentan.

Cuando el Al_2O_3 , presenta una pureza mínima del 95%, tendrá una tonalidad marrón, mientras que si se presenta una pureza mayor al 99% será de un color blanco.



Figura 11 Óxido de aluminio como agente pulidor [14]

El carburo de silicio, al igual que el óxido de aluminio es uno de los agentes abrasivos más utilizados. El carburo de silicio es conocido por diferentes nombres, por ejemplo, carborundo, carburidon, entre otras formas, este carburo se encuentra principalmente constituido por carbón y silicio en estequiometría 1:1, dando como resultado una formación de estructuras tipo diamante, sin embargo, existen 3 subclasificaciones, cubica, hexagonal y romboédrica.

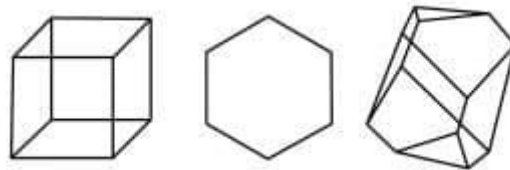


Figura 12 Estructura química del carburo de silicio [52]

La estructura obtenida permite que esté presente una gran resistencia mecánica muy grande, la cual es posible comparar a la de un diamante, llegando a tener una dureza de entre 9 a 9.5 en escala de Mons. Además, estas estructuras presentan aristas muy filosas permitiendo que sea utilizado y catalogado un de los mejores abrasivos, logrando acabados finos.



Figura 13 Carburo de silicio [52]

Cuando se lleva a cabo la operación de decapado, el uso de un agente abrasivo es primordial, siendo una de las maneras más utilizadas, es que el agente abrasivo vaya colocado o sujetado sobre una base, esta superficie puede ser papel, cartón u otro material cuando el agente abrasivo es colocado en una base se le denomina lija. Las lijas han presentado grandes ventajas, principalmente que son de muy bajo costo, así como que permite que pueda ser utilizada seca o húmeda.

Cuando se habla de lijas existe una gran clasificación de estas ya que es posible clasificarlas de diversas maneras, siendo las más comunes a partir de las siguientes características: material de los granos, la cantidad de granos que pueda tener la lija, el tipo de material del soporte, el aglutinante o el recubrimiento, sin embargo, las clasificaciones más comunes según Norton Abrasives mostrados en la tabla:

Tabla 11 Tipo de lijas a partir del número de granos [29]

Tipo de lijas	Numero de granos
Muy gruesas	40 a 60
Gruesas	80 a 120
Medias	150 a 180
Finas	220 a 240
Muy finas	280 a 320
Super fina	360 a 600
Extra fina	800

Otra de las clasificaciones más comunes es a partir del peso del papel (ligero o pesado), esto depende de su uso como se muestra en la tabla 12.

Tabla 12 Reverso de papel [29]

Denominación	Clase	Aplicación
Peso A	Peso ligero	Operaciones manuales y en máquinas portátiles eléctricas y neumáticas.
Peso B		
Peso B y C impermeable	Peso leve	Operaciones refrigeradas manuales y en máquinas portátiles eléctricas y neumáticas.
Peso E	Peso pesado	Operaciones mecánicas en máquinas fijas (grandes y medianas) y en máquinas portátiles eléctricas y neumáticas.
Peso F		
Peso G	Peso pesado	Operaciones de lijado en máquinas fijas (grandes y medianas).
Peso H		

Además del uso del papel es utilizado también el tejido, cuando se deben soportar grandes esfuerzos mecánicos, ya que el tejido proporciona una gran resistencia a la tracción, al rasgado y al estiramiento, en la tabla 13 se puede observar el uso recomendado de estas.

Tabla 13 Reverso de tejido [29]

Denominación	Clase	Aplicación
Lona	J	Es el más ligero de todos, posee media resistencia y flexibilidad. Se utiliza en hojas o combinación con papel.
Jeans	J	Ligero y flexible, es más resistente que la lona. Se emplea en lijas que no sufren grandes esfuerzos mecánicos y que necesitan una gran flexibilidad.

Drills	X	Con cuerpo más pesado y resistente, ideal para operaciones mecánicas en general.
Satín algodón	X	Es más resistente que el Drills, siendo indicado para operaciones severas (desbaste pesado).
Satín Poliéster	Y	Es robusto y más resistente a la rotura longitudinal que el satín algodón. Utilizado en operaciones severas, en seco o refrigeradas.

4.2.1.2: Pastas y rodillos para pulir

El pulido, como el decapado, realiza con los mismos componentes, los cuales tienen la función, lograr el brillo máximo en la pieza, a partir del uso de unas ruedas de materiales no abrasivos, como pueden ser de sisal, tela o felpa, además de una pasta de pulido.

En pastas de pulido existe una gran variedad ya que la selección de esta dependerá de las necesidades como se muestra a continuación.

1. **Pasta verde** este tipo de pasta es la que más utilizado para dar el máximo de los acabados en los metales blandos y duros, proporcionando un acabado tipo espejo de máxima calidad, ya que la calidad de esta pasta es la mejor del mercado, por lo que se recomienda para aceros inoxidable o aluminios.
2. **Pasta blanca** la pasta blanca es una de las más recomendadas para su uso en rueda de pulir de fieltro, ya que permite obtener un acabado tipo espejo, sin embargo, el acabado que se obtiene es una calidad inferior si se compara con el obtenido con la pasta de pulido verde, sin embargo, es una de las más utilizadas para materiales como el mármol, granito, metales blandos no ferrosos, entre otros.
Para tener un buen acabado con este tipo de pasta, será necesario un tratamiento previo de pulido con el fin de eliminar imperfecciones superficiales, así como algún depósito metálico que pudiera existir.
3. **Pasta café** La principal función que cumple, es la eliminación de grasa que pueda existir sobre la superficie del metal, además que permite eliminar rayaduras superficiales de una manera formidable, obteniendo una apariencia uniforme sobre la superficie.

4. **Pasta café tipo – A** El uso principal es joyería u orfebrería, debido al acabado que proporciona las piezas. Esta pasta de pulido tiene una apariencia café – rojiza.
5. **Pasta gris** La pasta gris es altamente abrasiva, por lo que generalmente se utiliza para eliminar irregularidades en la superficie del metal, generadas por el proceso o bien son imperfecciones propias del metal, como son rebabas, marcas de óxido, entre otras, por lo que se debe utilizar con ruedas de sisal para lograr eliminar de la mejor manera rugosidades o surcos en el metal.
6. **Pasta negra** Es utilizado para dar un primer abrillantado al material, además esmerilar, ya que este tipo de pasta es la más abrasiva que se puede encontrar en el mercado, sin embargo, este tipo de pasta presenta muchas mayores ventajas comparando con los otros tipos de pasta, ya que se presenta un mayor rendimiento y un menor consumo.



Figura 14 pastas para pulir [31]

Para realizar una buena selección de una rueda de pulido se deberá conocer qué tipo de trabajo se desea realizar, además de conocer el tipo de pasta de pulido

emplear, con el fin de obtener el mejor acabado en la superficie del material, por lo que se presenta a continuación, las ruedas más comunes para este fin.

Rueda de sisal Estas son las más utilizadas para el pulido de acero al carbón, acero inoxidable metales ferrosos y no ferrosos.



Figura 15 Rueda de sisal [45]

Rueda de tela Es utilizada para dar un acabado brillante en metales ferrosos, no ferrosos, metales blandos, así como en piezas de plásticos, entre otros materiales.

Las ruedas de tela pueden ser encontradas en diferentes presentaciones como pueden ser en varias capas de tela o el material puede presentar diferentes durezas, como pueden ser blando, medios o duros.



Figura 16 Rueda de tela [46]

Rueda de felpa Son comúnmente utilizados con pasta en metales ferrosos como el acero al carbón, acero inoxidable, metales no ferrosos, aluminio, pasticos, vidrio, mármol, piedra entre otros materiales.



Figura 17 Rueda de felpa [25]

4.2.2: Pulido químico

El pulido químico consiste colocar las piezas en una solución acida, con el fin de eliminar partículas o cualquier otro elemento que pueda afectar la superficie, a partir de un ataque químico. La solución a utilizar debe de estar compuesta por un 85% de ácido fosfórico, 3.5% de ácido nítrico y 15% de agua, durante un periodo de 3 segundos a 3 minutos a una temperatura de 100°C.

El pulido químico no necesita de grandes equipos, solo es necesario contar con una tina, pero la selección del material, es un aspecto a tomar en cuenta, ya que se recomienda que la tina, se construya con acero inoxidable, debido a que presenta una gran resistencia a un ataque químico o a la corrosión provocado por la solución acida del proceso. Por otra parte, es necesario colocar un calentado a fuego directo, con el fin de conservar una temperatura constante en la solución.

Otro componte, es una campana de extracción de gases, principalmente a las altas emanaciones de gases ácidos en el proceso.

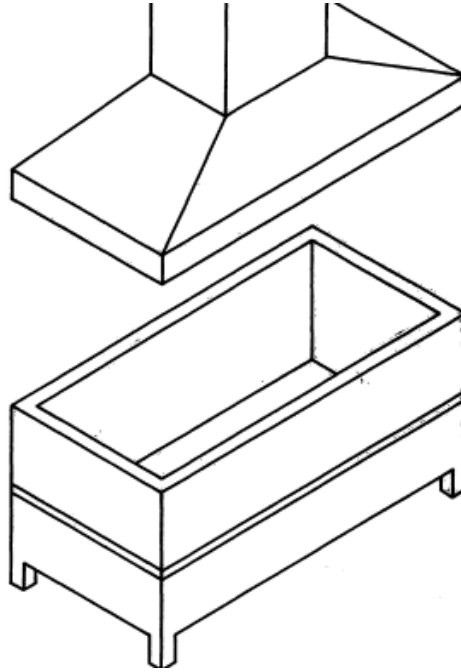


Figura 18 Tanque de pulido [43]

4.2.3: Pulido electroquímico

El pulido electroquímico es una de las soluciones más modernas e innovadoras, debido a que una técnica amigable al medio ambiente, principalmente se debe que la solución que se utiliza como electrolito, no contiene ácido crómico en su composición, permitiendo un ahorro en equipos para el tratamiento de los residuos y agua. Además, siendo más seguro para los operadores ya que no produce gases nocivos

El pulido electroquímico, presenta un costo menor para la industria ya que consume una densidad de corriente muy baja y una vida útil del electrolito. Por otro lado, el proceso de pulido permite pulir superficies muy grandes de aluminio con mayor facilidad y rapidez.

Cuando se busca obtener un pulido de máxima calidad el mejor electrolito a utilizar será a base de ácido fosfórico en una proporción de 70% peso, además de las siguientes condiciones de operación para tener los mejores resultados las cuales se pueden observar en la tabla 14.

Tabla 14 operación del pulido electroquímico

Temperatura	60 °C
Densidad de corriente	2-8 A/dm ²
Tensión	10-15 V
Tiempo de pulido	3-5 min
Material de cátodo	Plomo o acero inoxidable

El pulido electroquímico utilizado consiste en una tina la cual puede ser de acero inoxidable, recubierto con un polímero como PVC, PPH, entre otros. Además, debe contar con un sistema de calentamiento, con el fin de siempre conservar la misma temperatura en la solución y soportes para colocar los racks de las piezas que cumplen la función de ánodo y el soporte del cátodo como se muestra en la figura 19.

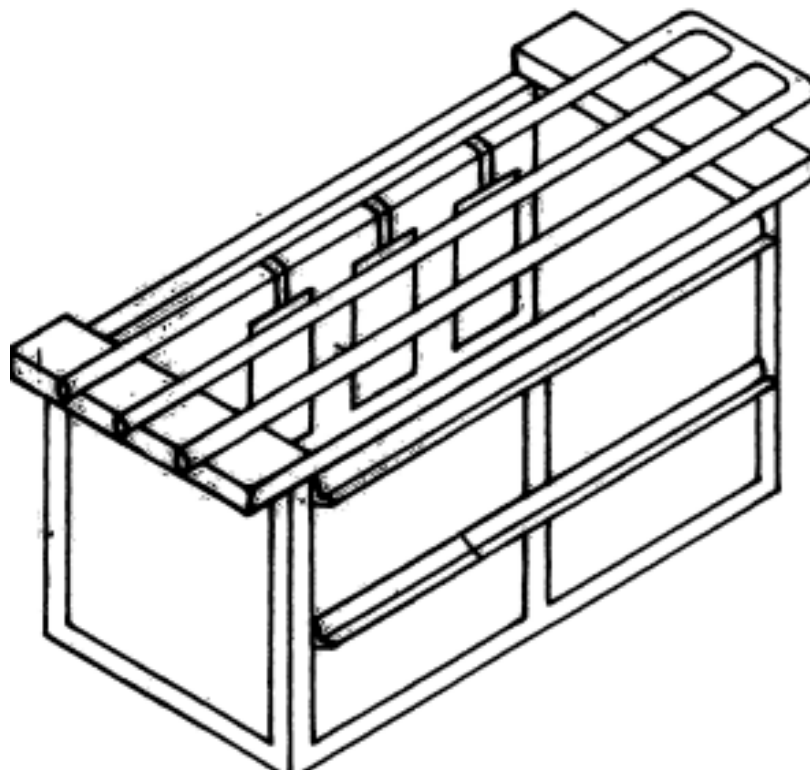


Figura 19 Tanque para celda de pulido [43]

4.3: Equipos eléctricos

Cuando se busca formar un recubrimiento de óxido sobre la superficie, es necesario contar con un equipo que proporcione corriente continua, este equipo lleva el nombre de rectificador, el cual tiene como principal función convertir la corriente alterna a corriente continua, además de reducir el voltaje. Cuando se busca un rectificador puede tener una variación en el voltaje, esto principalmente depende del tipo de electrolito, la tensión puede variar entre 1 hasta 300 Voltaje de corriente continua, sin embargo, típicamente este se encuentra entre los rangos de 15 a 21 V, además otro factor a considerar es la corriente de anodizado, esta depende del área que se va anodizar por lo que generalmente se encuentra en valores de 30 a 300 A/m². En la figura 20 se puede observar una representación de un rectificador de corriente.

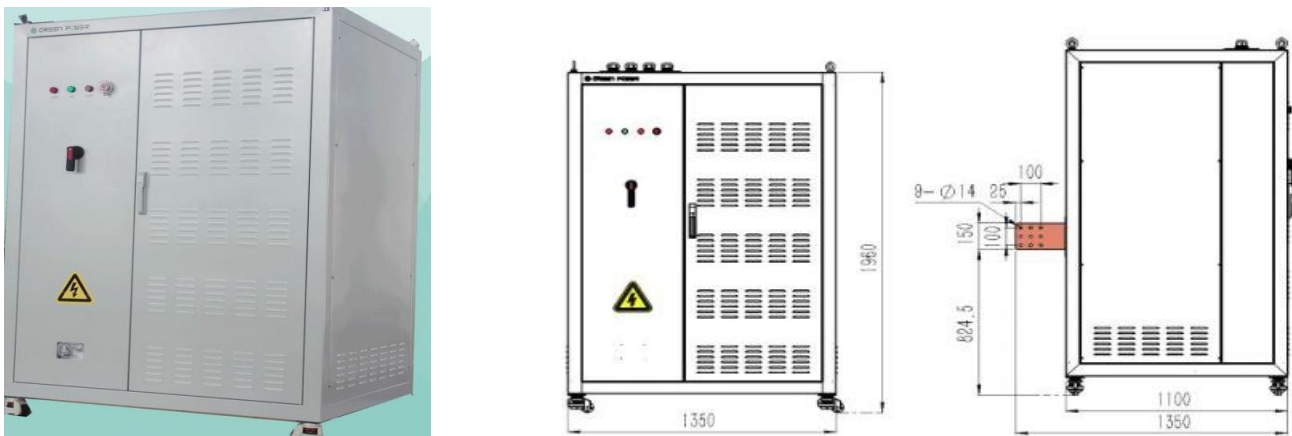


Figura 20 Rectificador de corriente [23]

4.4: Soportes y estructuras

Es uno de los elementos más simples, sin embargo, presentan una función primordial son los soportes o estructuras, ya que serán los encargados de enganchar el material el cual se desea anodizar. Este elemento se le conoce principalmente como rack.

En la actualidad cuando se realiza la formación del recubrimiento, se utiliza racks de titanio, ya que estos presentan mejores propiedades en comparación a los de aluminio, esto se debe principalmente a que permiten una mejor conductividad de

la corriente, además presentan mejor resistencia en comparación a los de aluminio y una vez terminado el proceso de anodizado no será necesario realizar un proceso de desanodizado.

El proceso de desanodizado consiste en la eliminación de la capa anódica sobre la superficie de un metal, esto se logra apartir de sumergir la pieza una solución de hidroxido de sodio o bien en una solución de ácido sulfurico, fosforico y nitrico.

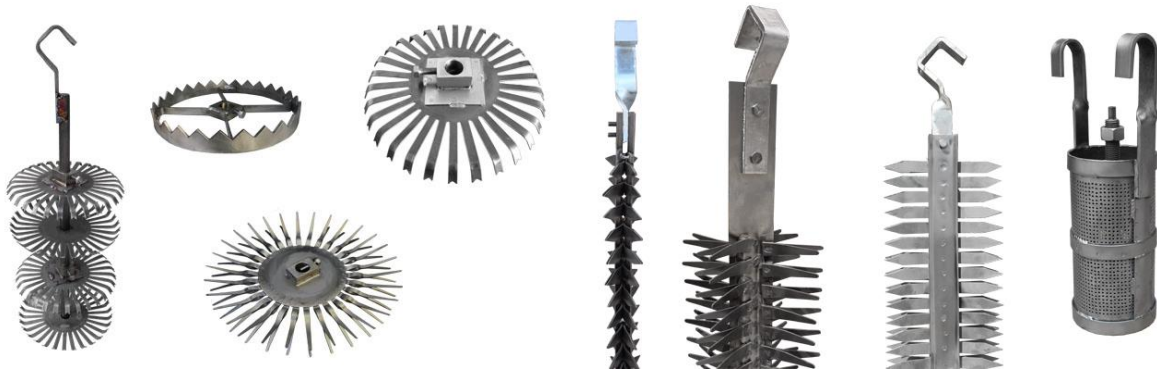


Figura 21 Soportes para el anodizado [47]

4.5: Tinas

Durante el proceso de anodizado uno de los componentes más importante durante el proceso son las tinas las cuales juegan un papel muy importante, además de estar presentes en casi cada una de las etapas, desde el momento de hacer primer enjuagado, hasta las últimas etapas, como son el teñido o el sellado.

4.5.1: Tinas y equipos para desengrasado y decapado

Cuando se comienza el proceso, se debe llevar a cabo una etapa de limpieza, siendo este el proceso de enjuagado o decapado el cual busca eliminar cualquier impureza que no permita que se forme de manera uniforme el recubrimiento anódico.

En la actualidad las tinas de desengrase y decapado, son totalmente automatizadas, eliminando, la participación humana favoreciendo la reducción del tiempo,

aumentado así la capacidad de producción, además es posible garantizar el correcto lavado de las piezas.

El objetivo principal es la eliminación cualquier tipo de sustancia o resto de materia contaminante, como polvo, aceite, grasas, entre otras. Sin embargo, se debe considerar los factores que afectan al momento de realizar la limpieza, por esto se debe realizar una correcta selección en el detergente es primordial, considerando principalmente, el material, tipo de suciedad que se busca eliminar y la temperatura de 90°C que soporta el detergente antes de degradarse.

Cuando se busca seleccionar un equipo de limpieza, como el mostrado en la figura 22, se debe considerar, el método por el cual se va hacer la limpieza, esto si será estático, continuo, de que tipo será la producción, esto es producción en serie o por piezas, el grado de automatización, espacio a utilizar, la capacidad de lavar perfiles de diferentes tamaños, energía, consumo energético y precio de mantenimiento.



Figura 22 Equipo de Limpieza continuo [9]

4.5.2: Tinas de enjuague y neutralizado

Cuando se debe realizar un procedimiento de enjuague se debe hacer una correcta selección del equipo esto se debe principalmente al electrolito utilizado durante el procesamiento, ya que establecerá composición y la concentración del producto

para neutralizar, esto es porque debe existir una compatibilidad entre el electrolito ácido y el agente neutralizador.

Además, la correcta selección de la materia con el que será construido la tina de neutralizado es de suma importancia, ya que el agente neutralizador podría generar corrosión en el equipo incluso picaduras por lo que existe una alta gama de materiales, siendo, los más comunes y recomendables el Polipropileno homopolímero (PPH), Polifenilén éter (PPE), Policloruro de vinilo (PVC) o Policloruro de vinilo clorado (CPVC).

Este tipo de tanques se componen de un sistema de válvulas de mariposa, ya que se debe suministrar aire, con el fin de realizar un buen enjuagado, además debe ir acompañado por un soplador de alta presión y un sistema de ingreso de tipo Venturi.



Figura 23 Tinas de enjuague o neutralizado [2]

4.5.3: Tanque de teñido

Al momento de realizar el teñido del aluminio se debe considerar como serán las características del tanque, puesto que se encuentran en contacto directo con los colorantes los cuales se encuentran en disolución en medios ácidos por la presencia de ácido acético, por lo que no se puede utilizar cualquier tipo de material para su

construcción de tanques se encuentran principalmente contruidos con hierro, sin embargo, no pueden ser cualquier tipo de hierro, este debe presentar una alta resistencia a la oxidación, debido a que los colorantes son altamente sensibles, por lo que al existir presencia de un agente altamente contaminante, podría ocasionar que el colorante quede inutilizable, por esta razón el material más indicado para este fin es el uso de acero inoxidable, gracias a sus características de durabilidad, resistencia a ataques químicos y su facilidad de limpiar lo hacen el material idóneo. Además, tiene la posibilidad de poder integrar un sistema de calentamiento a fuego directo y de ser necesario un aislamiento térmico con el fin de evitar pérdidas de calor.

4.5.3 Tanque de sellado

Una de las últimas etapas de proceso corresponde a la etapa de sellado con acetato de níquel, esta se realiza a temperaturas altas mayores a los 90°C que se debe encontrar en una solución ácida, se recomiendan materiales resistentes a la temperatura, que permita tener un calentamiento a fuego directo, y resistir a medios ácidos, principalmente para evitar ataques químicos o procesos de oxidación, lo que el acero inoxidable lo convierte en excelente candidato con un recubrimiento aislante térmico esto con el fin de prevenir o evitar grandes pérdidas de calor.

4.6: Celda de anodizado (tanque de anodizado y electrodo)

La parte más importante del proceso es el crecimiento del recubrimiento anódico, utilizando un electrolito ácido y un electrodo llamado cátodo, sin embargo, se debe considerar diferentes factores, principalmente la concentración de electrolito, así como la naturaleza del electrolito permitiendo una correcta selección de los materiales de construcción de los equipos.

4.6.1: Tanque de anodizado

Al momento seleccionar un equipo es importante la correcta selección del material del que será construido o revestido el tanque. En la actualidad, durante el proceso se utilizan productos químicos altamente agresivos provocando una ruptura o

perforación de equipo, generando fugas y derrames lo que lo convierte peligroso para los operadores de los equipos, causando lesiones o intoxicación.

Cuando se decide construir un tanque, un amplia gama de materiales los cuales pueden ir los aceros al carbón, pasando por aceros inoxidable especiales y una gama de plásticos que son capaces de resistir medios extremadamente ácidos, evitando la corrosión, además a los tanques se les puede instalar un recubrimiento, el cual tiene como función aumentar su resistencia, los más comunes a utilizar son algunos plásticos, fibra de vidrio o incluso metales como plomo, otra de las ventajas que ofrecen estos recubrimientos es que son utilizados como aislantes y ayudan a evitar la acumulación de materia en las superficies interiores del tanque.

En estos momentos se recomienda la construcción de tanques de anodizado con materiales como el polipropileno debido a su alta resistencia a la corrosión, se recomienda además espesores de $\frac{1}{2}$ a 1 plg, así como una serie de refuerzos exteriores para una mayor resistencia, como se observa en la figura 24.



Figura 24 tanques de anodizado [20]

4.6.2: Electroodos

Un elemento indispensable, es el cátodo con el cual se va llevar a cabo el proceso, durante mucho tiempo se utilizaron cátodos de plomo, sin embargo se ha observado que para una mejor operación es mejor utilizar cátodos de aluminio ya que este ofrece muchas mejores ventajas, una de las más importantes es que presenta una mayor vida útil, no existe contaminación de baño de anodizado por presencia de

plomo, no presenta acumulación de calor y al terminar su vida útil el aluminio no es considerado un residuo peligroso y presenta una facilidad de disponer los residuos.

El cátodo más utilizado y recomendable es la aleación de aluminio 6063-T6 en una relación de ánodo a cátodo de 3:1, esto proporcionara resultados consistentes.

La colocación del cátodo de aluminio será en extremo del tanque, mientras que el ánodo será la pieza que se desea anodizar, además se deberá colocar entre ellos un aislador esto con el fin de evitar un corto circuito, aunado a esto deberá existir algún equipo que permita contrarrestar el efecto térmico, generado por la reacción exotérmica que se está llevando a cabo, como un sistema de agitación por medio de aire, buscando que en todo momento y cualquier parte del tanque la concentración sea la misma.

Cuando se utilizará un electrolito diferente del ácido oxálico o ácido sulfúrico, en este caso ácido crómico no se deberá utilizar ningún equipo, componente o electrodo construido a partir de plomo esto se debe porque al ácido crómico es altamente reactivo con el plomo y dando como resultados películas de cromato de plomo.

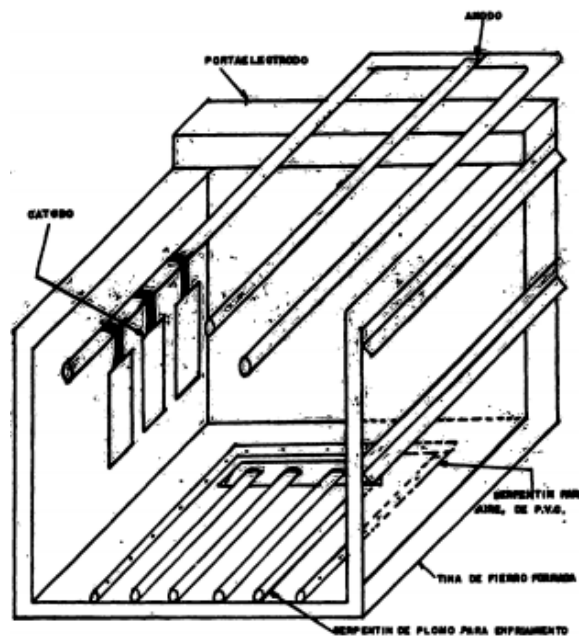


Figura 25 Celda de anodizado [43]

4.7: Sistema de refrigeración

Durante todo el proceso de anodizado es importante mantener la óptima temperatura y constante, esta temperatura dependerá de tipo de ácido, como de las características físicas que se desea obtener en el recubrimiento, sin embargo, por lo general el rango de temperatura de operación se encuentra en valores de entre 20 y 28°C, además que debe ser homogénea en todo momento del proceso.

El sistema de enfriamiento más utilizado en la actualidad es a partir de agua ya que este ofrece una mucha más seguridad, al operario, en comparación de los antiguos, a partir del uso del amoníaco o del freón 12. El sistema de enfriamiento consiste de un serpentín, el cual puede estar construido, a partir de diferentes metales, principalmente plomo, aluminio o algún acero inoxidable el cual es colocado en la parte inferior del tanque, además de un equipo auxiliar para el enfriamiento constante del agua, este será un chiller.

4.8: Sistema de agitación

Un punto de muy importante a tomar en cuenta es mantener la concertación del electrolito en cualquier punto del tanque, esto con el fin de mantenerla homogenizada y se lograr a partir de un sistema de agitación por aire, para que el aire pueda ser utilizado, debe cumplir 2 características fundamentales, este debe ser seco y limpio.

El sistema consiste en una red de tuberías de acero inoxidable de 1 ¼ plg, el cual se coloca en el fondo del tanque, la tubería tendrá una serie de orificios a lo largo de la red, de aproximadamente 4mm de diámetro, además la red deberá ir conectado a un ventilador el cual se buscará que ofrezca una caudal mayor o igual a 100 m³/h.

4.9: Sistema de extracción y lavado de gases

En casi toda la etapa del proceso y principalmente en el proceso de anodizado, teñido y desengrasado, se utilizan agentes químicos altamente corrosivos y tóxico,

que a su vez producen emanación de gases tóxicos, como son gases ácidos por el proceso de anodizado y teñido o en el desengrasado el detergente utilizado produce otro tipo de gases, los cuales pueden llegar a producir lecciones o afectaciones al sistema respiratorio, así como daños al medio ambiente.

Por estas razones se colocará un sistema de extracción y lavado de gases, el cual estará conformado en un solo equipo, este se compone de una campana de extracción, la cual es construida de acero inoxidable, la campana de extracción será colocada, sobre las tinas donde suceda estas etapas. Por la campana circularan los gases y pasaran por un ventilado, el cual llevará los gases a una torre lavadora a partir de agua. La campana de extracción deberá tener la capacidad de extraer y tratar, aproximadamente un caudal mayor a los 100 000 m³/h.

Capítulo 5: Teñido y acabados del recubrimiento

La etapa final del proceso es la etapa de teñido y sellado, nos permite dar la apariencia y la estética final al producto, existiendo una gran cantidad de colores y acabados, esto dependerá del uso que se le desea dar al producto, ya sea arquitectónico o decorativo, entre otros.

Entre los acabados más comunes pueden destacar 4 principalmente:

- Brillantes
- Mates
- Naturales
- Coloreados

Por otra parte, es posible hacer una combinación entre acabados, esto va desde coloreados con acabado mate o naturales brillantes.

5.1: Acabado brillante

Los acabados brillantes son de los más utilizados y más comunes de encontrar en el mercado, principalmente utilizados para la decoración, utensilios de cocina entre otros. Este acabado es posible obtener de 3 diferentes maneras de pulidos, el mecánico, el cual se explicó en la sección 4.2. Este tipo de pulido ofrece una gran ventaja es mucho más económico realizarlo, en comparación de un pulido químico y electroquímico, sin embargo, presenta grandes limitaciones, como imperfecciones o ralladuras sobre la superficie del material, impidiendo que esta sea completamente plana.

Sin embargo, el pulido químico y el pulido electroquímico ofrecer mejores acabados, llegando a obtener un acabado tan brillante el cual es denominado acabado tipo espejo. El acabado espejo se obtiene mediante un ataque ácido a partir del uso de ácido sulfúrico, fosfórico y nítrico en solución, logrando modificar la superficie, obteniendo una superficie más plana y como resultado una máxima reflexión de la luz, lo que se traduce, como un brillo muy intenso, como se muestra en la figura 18.

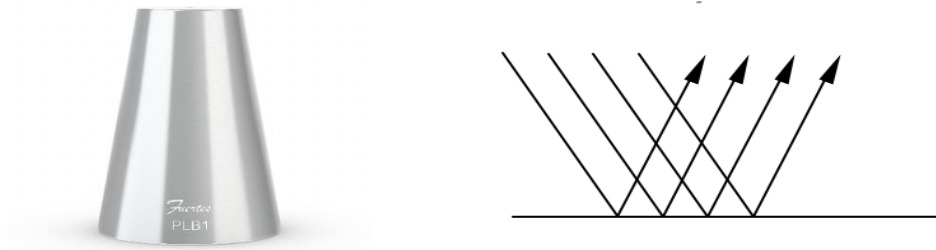


Figura 26 Acabado Brillante [3]

5.2: Acabado mate

Cuando se busca obtener acabados mates, una de las técnicas más comunes y con mayor resultado, es una mediante un ataque alcalino, consiste en el uso de sosa cáustica, sobre la superficie del material, permitiendo obtener una superficie rugosa al tacto, además de la apariencia mate. La superficie mate genera que la reflexión de la luz sea discontinua, como se puede ver en la figura 19, lo que le da el característico acabado opaco.

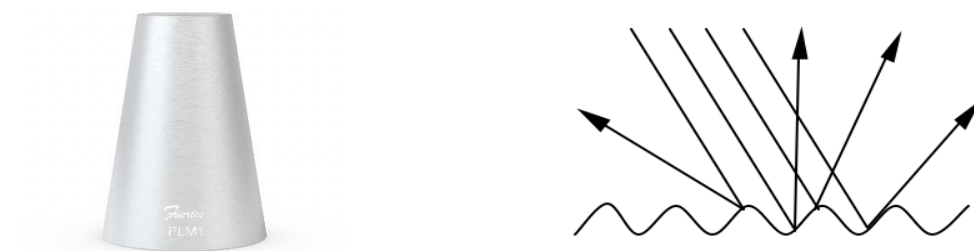


Figura 27 Acabado mate [3]

Además del ataque químico con hidróxido de sodio, existen tratamientos mecánicos, que permiten obtener la rugosidad y la opacidad necesaria para la apariencia final del material.

Los dos tratamientos más comunes y que ofrece casi la misma calidad y apariencia en el acabado, en comparación con un ataque químico son:

1. Arenado o chorreado: Consiste, en proyectar partículas muy pequeñas de arena sobre la superficie del aluminio a gran velocidad, esto se logra mediante un compresor que las lanza en forma de chorro e impactándose.
2. Satinado mecánico: Esta técnica es considerada abrasiva, y se consigue mediante el cepillado con discos abrasivos, principalmente de óxido de aluminio o de carburo de silicio, estos generan una rugosidad lineal sobre la superficie, lo que al tacto y a la vista es de una apariencia diferente en comparación del obtenido mediante el arenado.

5.3: Acabado natural

El acabado natural es el acabado más simple y fácil que se pueda obtener ya que este no requiere de ningún tipo de teñido, solamente es necesario realizar el proceso de sellado, al momento de terminar el proceso de anodizado. Este tipo de acabado es principalmente utilizado para el denominado acabado arquitectónico, para cancelería e incluso en decoración, el acabado natural es económico, además de que existe la posibilidad en encontrarlo en terminación mate o brillante.

5.4: Duranodik

El duranodik o anodizado duro, es una de las técnicas la cual permite la formación de un acabado de alta dureza equivalente al acero cimentado, además de presentar un espesor mayor en comparación de la formación de un método tradicional con ácido sulfúrico, sin embargo, se debe dar una serie de condiciones específicas de temperatura entre 0 a 5°C, esto con el fin de evitar la disolución de la capa de óxido.

El duranodik, presenta una apariencia muy particular, sin embargo, la apariencia del acabado dependerá de las aleaciones de aluminio, así como de espesor formado, sin embargo, existe una de gama de colores, siendo los más importantes los colores como el bronce, marrón y gris-negro, como se observa en la figura 28, a pesar de esto es posible teñir de otras tonalidades sin embargo el más común es el negro.



Figura 28 Apariencia después de un proceso de duranodik [5]

5.5: Teñido del aluminio

Cuando se busca teñir una pieza de aluminio existe una gran posibilidad de productos en el mercado, ya que es posible teñir de una gama de colores de los que pueden ir desde los tonos plateados, dorados, colores más llamativos como verdes, azul, rosas, colores oscuros, como cafés y negros.

Además, es posible obtener colores especiales, a partir de una serie de combinaciones, buscando obtener colores más exóticos y específicos, por ejemplo, si se desea obtener un verde tipo camuflaje, el cual es necesario una serie de tintes como son el verde olivo, gris BL, marrón, verde AEN y negro.

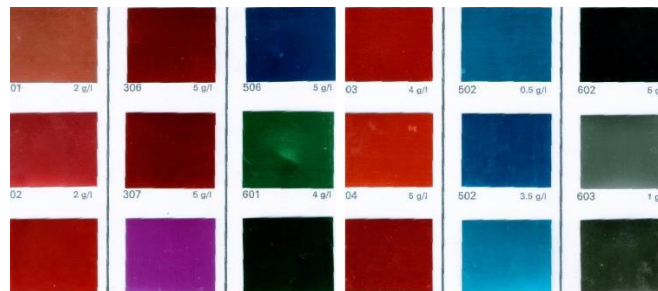


Figura 29 Colorante Sandoz [12]

Por lo general cuando se debe realizar un teñido se debe realizar, en una tina únicamente para esta etapa, ya que los tintes son delicados y cualquier tipo de contaminante podría dejarlo inutilizado. Además, se debe cuidar la concentración del tinte ya que la concentración dependerá de presentación final, por ejemplo, el

tinte “Aluminium Fast Blue G”, marca Sandoz, recomienda una concentración de 5 g/L de colorante, mientras que el tinte, “Green E-AEN” de la marca Interactiva anodizing, se recomienda una concentración de 10 ml por cada litro de solución.

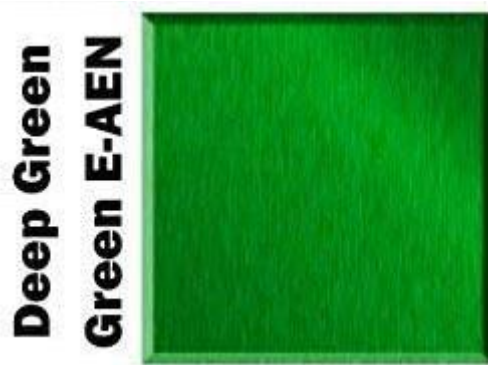


Figura 30 Green E-AEN, Interactiva anodizing [26]

Sin embargo, la gran mayoría de los tintes se deberá cumplir una serie de condiciones, como son el agua para la solución deberá ser preparada con agua desionizada, además, se deberá tener el pH entre 5.4 – 6.0, el cual deberá ser ajustado a partir de ácido acético o con hidróxido de aluminio, una temperatura debe ser 48 a 60 °C, durante un tiempo de 4 a 15 min, esto dependerá principalmente de la intensidad del color que se desea. Además, se debe tener una agitación constante, esto para que el baño, sea constante y no exista diferencia de intensidad en el resultado final, así como que la temperatura sea uniforme en todo momento.

Sin embargo, no todas las aplicaciones de tintes se realizan de la misma manera, un ejemplo muy claro es el colorante Orminal 4N, de la marca Durand & Huguenin Ltd. Basle. Este tinte está compuesto principalmente de oxalato férrico, el cual produce tonalidades de las cuales van de colores claros llamados “Champagne”, hasta colores tipo oro, como se observa en la figura 30.

Para poder obtener toda esta gama de colores se deben de dar una serie de condiciones diferentes, ya que la tonalidad dependerá principalmente del tiempo en el que se lleva a cabo el teñido con Orminal 4N.

Para poder realizar la aplicación del tinte, el espesor del recubrimiento anódico, mínimo debería de ser 5 a 25 micras, además el recubrimiento debe ser enjuagado con abundante agua, mientras que la concentración deberá de ser de entre 10 a 50g/L, esto dependerá de la tonalidad se desea obtener y la temperatura de 35 – 70°C.

La tonalidad y la intensidad del color que adquiera el material dependerá del tiempo que dure el baño, ya que si se somete a tiempos bajos de 15 s se tendrá un tono Champagne, mientras que si se somete durante un tiempo de 15 minutos se obtiene colores oro como se observa en la figura 23.

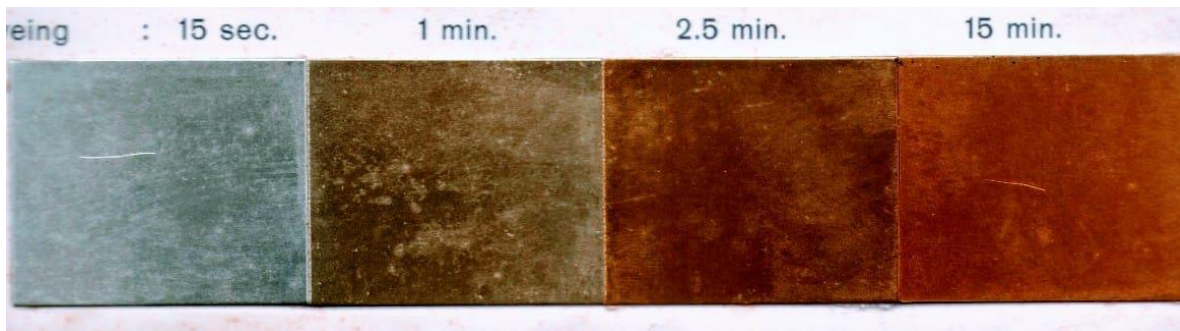


Figura 31 Orminal 4N, Durand & Huguenin Ltd. Basle [15]

5.5.1: Problemas, causas y soluciones inmediatas cuando se presentan problemas de teñido

Durante el proceso de teñido se puede presentar una serie de problemas, por lo que es necesario encontrar una solución, ya que se debe garantizar la calidad del teñido, por lo que CPA Corantes e Produtos para Anodização de Alumínio, nos presenta una serie de posibles soluciones para los principales problemas, por lo que es una ventaja ya que es posible tener soluciones inmediatas para los problemas que pueda presentar como se muestra en la tabla 15.

Tabla 15 Problemas y soluciones para el teñido [13]

Problemas	Causas probables	Soluciones
Disminución en la tonalidad del color	Contaminación en el baño. Colorante vencido.	Mejorar el enjuague
		Aumentar el tiempo de teñidura. Cambiar el baño.
Tonalidad del color cambia durante la producción	Película de anodizado es inconsistente.	Mejorar condiciones para garantizar procedimiento constante
Diferencia del color	Corriente irregular en el proceso de anodizado.	Limpiar contactos
	Aleaciones diferentes.	Teñir solamente aleaciones similares.
Cantos más oscuros	Densidad de corriente irregular y aumento de la temperatura en las bordas.	Reducir corriente/calor
		Bajar la temperatura de la teñidura y teñir por un periodo más largo.
Grandes áreas empañadas	Temperatura de anodizado no está uniforme.	Agitar el baño durante el anodizado.
Puntos claros.	Aceite en el colorante	Agitar las piezas en el baño de teñidura.
	Supercalentamiento local por pulimiento	
	Bojas de aire en los poros del anodizado	Re-anodizar rápidamente. Agitar piezas aumentar la agitación del aire.
Puntos oscuros.	Teñidura demasiada Aleación con alto contenido de impureza.	Reducir temperatura de la teñidura y aumentar el tiempo de teñidura
		Limpiar el baño de teñidura por medio de filtración
		Cambiar aleación
Capas opacas y sin brillo, removidas por limpieza.	Exceso de aluminio hidrolizado	Cambiar baño de teñidura
		Sumergir ácido en las piezas de teñidura para disolver y limpiar el aluminio.

5.6: Sellado

El sellado del poro es de suma importancia en el proceso de anodizado, ya que ayuda a mantener el tinte en la superficie, además el sellado permite reforzar, la protección contra la corrosión, el sellado es un procedimiento que se realiza mediante la inmersión de agua desionizada a una temperatura de ebullición, este tipo de procesamiento es llamado sellado hidrotérmico (SHT), el cual permite sellar los poros, sin embargo, suele ser poco eficiente y de mala calidad, no obstante se desea obtener un mejor resultado es posible, si se adiciona alguna sal de níquel, porque general se utiliza acetato de níquel.

Las condiciones que se deben de dar para un correcto sellado, para esto se debe realizar una solución de 4% de acetato de níquel, con agua desionizada, la inmersión debe durar un promedio de entre 2 a 6 minutos en el baño de acetato de níquel a una temperatura de 100°C.

Capítulo 6: Normativa de control de calidad.

Durante cualquier proceso industrial, se debe contar con controles de calidad, los cuales son establecidos, por diversos organismos, nacionales, internacionales o estándares que establece la misma compañía, todos estos organismos ofrecen una serie de recomendaciones o de mandatos de carácter obligatorios, establecidos principalmente por autoridades del gobierno o por organizaciones internacionales que permitan la exportación del producto final a diferentes regiones del mundo.

Las normas de calidad establecen, una serie de características, especificaciones mínimas del producto que debe cumplir, así como una serie de procedimientos, para poder realizar pruebas de calidad, así como los resultados esperados en los requerimientos de calidad, directrices, manejo de datos, resultados y la interpretación de estos para garantizar la seguridad y calidad de producto.

Los 3 principales organismos que se deben tomar en cuenta, siendo los que cuentan con mayor peso en la realización de normas, garantizando la calidad, durabilidad, entre otros. Los 2 organismos internacionales más relevantes son ATSM e ISO, mientras que a nivel nacional (México), las normas NOM o NMX, establecidos por la secretaria de economía.

6.1: Organismos regulatorios nacionales e internacionales

6.1.1: Normas ISO (Organización Internacional de Normalización)

La organización internacional de normalización es el encargado de la evaluación de normas y técnicas internacionales, buscando que los procesos o desarrollo de nuevos productos sean seguros, de calidad, además las normas establecidas por ISO tienen validez a nivel mundial, permitiendo que exista un gran intercambio comercial a nivel internacional, además estas normas son piezas clave para el desarrollo de normas de cada país, por ejemplo las Normas Oficial Mexicana (NOM), o las normas establecidas por la Asociación Americana Para Pruebas Y Materiales (ASTM).

6.1.2: Norma Mexicana (NMX) y Norma Oficial Mexicana (NOM).

A nivel nacional existen dos tipos de normativas, siendo la más importante la NOM. Las NOM, presenta un carácter oficial, esto quiere decir, se encuentran establecidas por el gobierno en el diario federal de la nación, por lo que se establece el cumplimiento en su totalidad, debido a su carácter obligatorio y de no ser cumplido podría tener consecuencias legales. En comparación la norma NMX, son de carácter voluntario, por lo que cada organización tendrá la decisión de llevarla a cabo o no, sin tener consecuencias, sin embargo, se recomienda cumplirlas, debido a que las NMX son realizadas a partir de la investigación o experiencia de las organizaciones.

6.1.3: Normas ASTM y AAMA

Unas de las normativas que en general se toman como punto de referencia nivel mundial, son las normas originarias de norte América, ya que estas proporcionan los principales fundamentos para el desarrollo de normas en el mundo, en este caso las normas mexicanas, además de proporcionar los principales parámetros, y los criterios de aceptación de las normas ASTM y AAMA.

Las principales organizaciones o asociaciones de Estado Unidos que establecen, y que indican los parámetros y clasificaciones de los recubrimientos anódicos, son la Asociación Americana Para Pruebas Y Materiales (ASTM) y la Asociación Americana De Fabricantes Arquitectónicos (AAMA).

6.2: Características del recubrimiento

6.2.1: NMX-W-138-SCFI-2004: Metales no ferrosos-aluminio y sus aleaciones-anodización-recubrimientos de óxido anódico en aluminio-especificaciones generales

Es una de las normas más importantes, ya que establece las especificaciones mínimas, así como los requerimientos generales, características y las propiedades de los recubrimientos anódicos, con el fin de asegurar la calidad de los recubrimientos anódicos.

6.2.1: Clasificaciones

6.2.1.1: Espesores

Una de las posibles maneras en las que se puede llevar a cabo una clasificación es mediante los espesores, ya que estos se realizan a partir de los valores mínimos del espesor del recubrimiento, la cual está dado en micrómetros, las cuales son designados a partir de las letras “AA” seguido del grado de espesor del recubrimiento, como se muestra a continuación en la tabla 16.

Tabla 16 Espesores [39]

Clase	Espesor promedio mínimo (µm)	Espesor local mínimo (µm)
AA-5	5	3
AA-10	10	8
AA-18	18	16
AA-25	25	22

Además nos ofrece una serie de recomendaciones, en cuando utilizar los diferentes espesores, por ejemplo se recomienda la clase AA-5, para uso en interiores, evitando ser expuesto a condiciones adversas usando para acabados naturales, AA-10, es posible ser utilizada en interiores o exteriores, siempre y cuando se cuente con un programa de mantenimiento para mantenerlo en las mejores condiciones, mientras que el AA-18 se recomienda en exteriores, con condiciones muy difíciles, ya que necesita un mínimo o nulo mantenimiento, por lo que es recomendado para ser utilizado en embarcaciones o aeronaves.

6.2.1.2: Apariencia

La apariencia es a partir de las características visuales que se pueden apreciar sin necesidad de un equipo de alta gama y/o se puede observar a simple vista, las características pueden ser el color, esto a partir de un patrón, espesor máximo de la capa, así como la uniformidad del recubrimiento anódico, brillo uniforme, resistencia a la abrasión, resistencia a la corrosión, o potencial eléctrico.

6.2.1.2.1: Calidad decorativa

Para cumplir este estándar el recubrimiento deberá tener una apariencia uniforme después del anodizado que deberá ser apreciable a una distancia menor de 3 metros.

6.2.1.2.2: Calidad brillante

Para obtener un acabado brillante, se debe utilizar un pulido mecánico especial, químico o electroquímico, para garantizar un terminado tipo espejo, de las características deseadas.

6.2.1.2.3: Calidad decorativa

Cuando se busca utilizar un recubrimiento anódico sobre un objeto de decoración deberá cumplir unas ciertas características, principalmente la película formada deberá ser homogénea cuando son inspeccionados a una distancia de 0.5m, además deberá estar libre de otro tipo de defectos visuales como manchas y rayas.

6.2.1.3: Sellado

El sellado de los productos debe ser un punto de suma importancia para la calidad, para poder comprobar el buen sellado se debe someter a pruebas para garantizar y buen funcionamiento del sello.

6.2.2: ASTM B580-79: Especificación estándar para recubrimientos de óxido anódico en aluminio.

Esta norma nos especifica, los estándares mínimos de calidad de los recubrimientos de óxido, las que van desde diferentes propiedades, como la apariencia, la resistencia a la abrasión, propiedades eléctricas y las propiedades contra la corrosión.

Un ejemplo que nos ofrece la norma para su evaluación de calidad son los principales defectos estético, así como el rendimiento que son verificados mediante

una inspección visual buscando rayones, porosidad, marcas del proceso de laminación entre otros.

Si se desea conocer mayor información, se podrá encontrar en el anexo 1.

6.2.3: AAMA 611-12: Especificación voluntaria para aluminio arquitectónico anodizado

Esta norma permite clasificar los recubrimientos anódicos, sí como las características que debe cumplir desde la duración del brillo del recubrimiento, la durabilidad y resistencia a ataques químicos, para garantizar la calidad y la durabilidad del producto cuando se utiliza en las condiciones establecidas por el fabricante, además de dar un acercamiento en los procedimientos de las pruebas de calidad necesarias, como los parámetros mínimos que debe cumplir.

Esta norma nos permite hacer 2 tipos de clasificaciones generales:

6.2.3.1: Clase 1

El recubrimiento anódico clase 1 es aquel acabado que corresponde a un acabado de alto rendimiento, el cual es comúnmente utilizado para estructuras exteriores, principalmente en edificaciones, ya que este tipo de recubrimiento, tiene la particularidad de soportar una alta exposición al medio ambiente, donde existe una gran presencia de agentes oxidantes o corrosivos.

Por lo anterior la clase 1 es altamente resistente por lo que es utilizado comúnmente en medios salinos, como estructuras de embarcaciones o construcciones en la costa, así como áreas de gran presencia de contaminación.

6.2.3.1: Clase 2

El recubrimiento clase 2 es uno de los más utilizados en acabados interiores, así como en exteriores liviano, sin embargo, si se desea utilizar en exteriores deberá recibir mantenimientos constantes y programados, debido a que los recubrimientos no presentan una alta durabilidad y una baja resistencia al desgaste, por lo que solo

es utilizado en cancelería, o si es utilizado en el medio ambiente deberá ser en zonas pocas salinas y un gran programa de mantenimiento.

Existe una serie de condiciones que deben cumplir los recubrimientos, como sus características y especificaciones para que pueda ser clasificado dentro de alguna de las clases de la tabla 17.

Tabla 17 Clasificación para la especificación volumétrica para el aluminio [28]

ESPECIFICACIÓN	Clase I	Clase II
Retención de color	10 años	10 años
Retención de brillo	15 unidades de variación	15 unidades de variación
Rango de brillo	4-30	4-30
Dureza	Excelente	Bueno
Espesor de película seca	0.7 milésima de pulgada	0.4 milésima de pulgada

6.2.4: ISO 7599-2010: Anodización del aluminio y sus aleaciones. Especificaciones generales para recubrimientos de oxidación anódica sobre aluminio.

La norma ISO 7599-2010 establece el método para especificar los diferentes recubrimientos especiales, así como las características que deben cumplir los recubrimientos de las diferentes capas de óxido.

Para conocer mayores especificaciones de esta norma ir al anexo 1

6.3: Pruebas y procedimientos de calidad

6.3.1: ASTM 457-67: Método de prueba estándar para medir la impedancia de recubrimientos anódicos en aluminio

La norma ASTM 457-67, nos describe la metodología para realizar la prueba para verificar y evaluar la calidad del sellado del recubrimiento anódico, a partir de la medición de un equipo de impedancia, con el fin de evaluar la calidad de los recubrimientos anódicos, ya que el recubrimiento posee una gran ventaja, gracias a la impedancia, que es la propiedad a la opción de los materiales al flujo de la

corriente y a que el óxido de aluminio no es un buen conductor es posible evaluar la calidad de los recubrimientos.

Por esta razón se espera obtener valores altos de impedancia, valores bajos de impedancia nos dice que el sellado no se realizó de manera correcta, esto sin importar el tamaño del recubrimiento, ya que tener recubrimientos de espesores muy gruesos no compensan un mal sellado.

6.3.2: ASTM B 368: Método de prueba estándar para la prueba de niebla salina con ácido acético acelerado con cobre.

Una de las cosas más importantes a evaluar, su resistencia a la corrosión, durabilidad y el desempeño del recubrimiento anódico, a partir de una prueba estándar de neblina salina con ácido acético, ya que nos permite evaluar su resistencia a la corrosión, al paso del tiempo, para verificar una buena calidad contra la corrosión, como la resistencia a medios adversos, principalmente en exteriores.

Para la realización de esta prueba, se debe cumplir una serie de condiciones, un pH de 3.1 a 3.3 el cual deberá ser rociado sobre la pieza a una velocidad de entre 10 a 20 mL/80cm²/hora, a una temperatura mayor a 49°C.

Para conocer con mayor detalle la metodología se recomienda revisar el anexo 1.

6.3.3: NMX-W-127-SCFI-2016: Aluminio y sus aleaciones-Anodizado-Recubrimientos de óxido anódico coloreados-Resistencia a la decoloración por la luz ultravioleta-Método comparativo de prueba

La NMX-W-127-SCFI-2016 tiene como objetivo definir el procedimiento y los pasos a seguir para medir cualitativamente la resistencia que presentan los recubrimientos con color ante una decoloración en presencia de luz ultravioleta, con el fin de encontrar la resistencia pueda llegar a tener cuando es expuesto a la luz solar o la intemperie.

A grandes rasgos se trata de una prueba muy sencilla, ya que se logra exponiendo la pieza a una fuente de luz ultravioleta, buscando visualizar los cambios que pueda presentar, mediante una comparación de tonos en los estándares de color, sin

embargo la velocidad del cambio en la tonalidad, dependerá principalmente de la intensidad de la luz U.V, cabe mencionar que la pieza no deberá alcanzar una temperatura mayor a 100°C, además el tiempo de exposición dependerá principalmente del acabado de la pieza anodizada, sin embargo casi todas las pruebas, tienen una duración menor a las 100h.

6.3.4: NMX-W-119-SCFI-2016: Aluminio y sus aleaciones-Anodizado-Determinación del espesor de recubrimientos de óxido anódico-Medición no destructiva por microscopio de haz dividido

El método no destructivo, busca determinar el espesor del recubrimiento anódico a partir del uso de un microscopio de haz de luz dividido.

Durante la prueba se debe dirigir un haz de luz laminar (I) tangencialmente en un ángulo de 45° sobre la superficie del recubrimiento una parte de haz (R1), se refleja por la cara exterior del recubrimiento mientras que el haz (R2), penetra el recubrimiento y emerge después de reflejarse en la interface del metal del recubrimiento, como lo ejemplifica la figura 32.

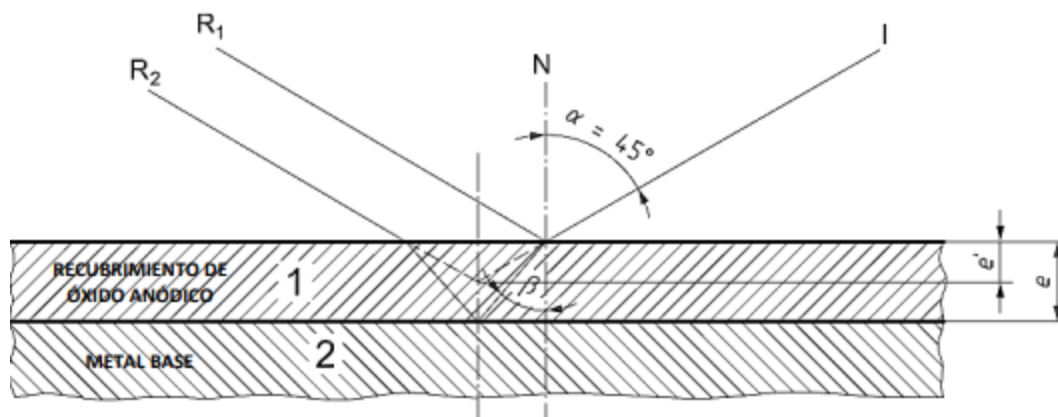


Figura 32 [41]

6.3.5: ISO 2143:2010 Estimación de la pérdida de poder de absorción de los recubrimientos de oxidación anódica después del sellado. Ensayo de mancha de tinte con tratamiento ácido previo.

Cuando se desea conocer la resistencia de los recubrimientos a la absorción de colorantes, este procedimiento nos permite conocer la calidad con la que se realizó el sellado y así conocer, observar cómo es el comportamiento del recubrimiento y verificar que presenta una buena resistencia a los agentes externos. Sin embargo, esta prueba no es recomendado cuando se tiene recubrimientos con espesores menores a $3\mu\text{m}$.

La prueba es realmente sencilla, ya que solo se requiere de una muestra desengrasada, para posteriormente ser sometido a un pequeño ataque ácido de concentración de 1.84g/mL de ácido sulfúrico, ataque deberá durar un tiempo de aproximadamente 1min, inmediatamente se deberá colocar una gota de colorante azul de pH 5 a una temperatura de 23°C por un tiempo de 1 min, para que después se someterá a una limpieza durante un tiempo de 20 s, si llega a existir alguna marca intensa, esto nos muestra que el sellado se hizo de una mala forma, mientras que si no hay presencia de colorante.

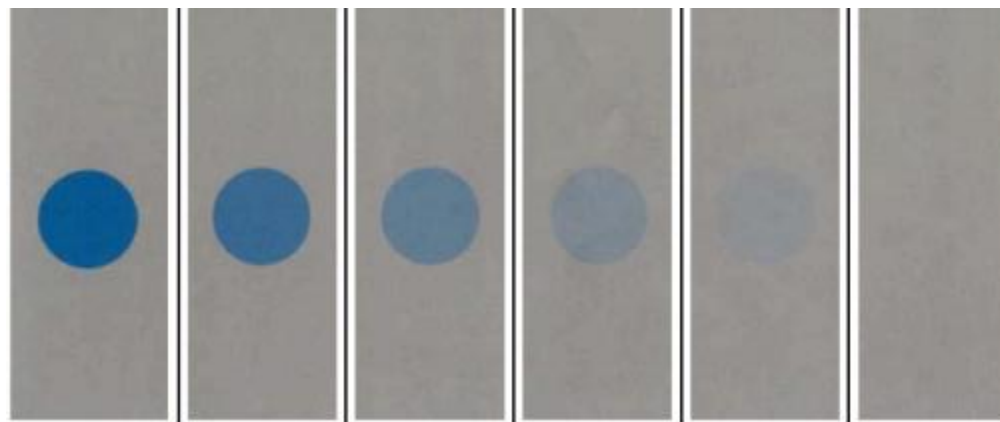


Figura 33 Prueba de sellado [30]

Conclusiones

A partir de los autores investigados y citados en el presente trabajo se desarrolló un manual con la búsqueda de información más reciente sobre los procesos de anodizado. Esto se debe a que en las últimas décadas el aluminio ha ganado gran relevancia en sector industrial, por lo cual, el campo de la galvanotecnia, tiene una gran importancia, debido a la posibilidad de producir recubrimientos protectores de óxido de aluminio en piezas y perfiles de aluminio, mejorando su resistencia a la corrosión y al desgaste.

La industria del anodizado de aluminio, tiene una importancia muy grande, buscando el desarrollo de nuevos procesos, permitiendo que exista un ambiente idóneo para la participación de los ingenieros químicos. Sin duda alguna la participación de los ingenieros químicos tiene una gran relevancia en el desarrollo de los procesos de anodizado, debido a la formación profesional que han tenido como estudiantes de la carrera. Por otro lado, las asignaturas de formación académica como química analítica, fisicoquímica, laboratorio experimental multidisciplinario, aportan una base sólida para el desarrollo de los futuros ingenieros químicos en la galvanotecnia, abriendo nuevas oportunidades en el campo laboral.

El desarrollo de este manual, permite conocer nuevas metodologías e información más actual en procedimientos nacionales e internacionales, especificaciones, ventajas o desventajas de diferentes procesos de anodizado, así como las condiciones de operación (temperatura, tensión, tiempo, concentración, entre otros). El desarrollo de este manual busca tener un alcance, en la actualización en los procesos óptimos y eficientes, garantizando la calidad en los recubrimientos anódicos, a partir de una serie de normas nacionales como la NMX-W-127-SCFI-2016 o internacionales, por ejemplo, ASTM 457-67 u otras normas mencionadas previamente, buscando que sea posible la comercialización a nivel mundial sin restricción alguna.

Así mismo se determinó que el mejor proceso de anodizado es mediante el electrolito soporte de ácido sulfúrico, en condiciones de temperatura de 25°C, una tensión de 24V, durante un periodo de 50 minutos.

Además, fue posible revisar una serie de especificaciones de equipos, los cuales permiten un mayor desempeño y mayor capacidad de producción, reduciendo tiempos, costos y materiales, comparado con equipos y manuales utilizados hoy en día, los cuales tiene un tiempo mayor a los 20 años, por lo que en algunos casos es posible que sea obsoleto y con las investigaciones actuales se busca tener un proceso mas eficiente o bien amigable con el medio ambiente.

Bibliografía

- [1]. A. Bautistav, V. L. (1998). Reducción del tiempo y de la temperatura de sellado del aluminio anodizado con aditivos orgánicos. *Rev. Metal. Madrid*, 34 .
- [2]. Acura precisión . (2022). *Línea de Tratamiento*. Obtenido de <https://www.grupoacura.com/acuraprecision/productos.html>
- [3]. AFV inicia: anodizado del alumnio . (2022). *Los colores del anodizado*. Obtenido de <http://www.afvinicia.com/colores-del-anodizado/>
- [4]. American architectural. (2019). *Voluntary especification for anodized architectuak aluminum* . United states: American architectural.
- [5]. Anesdur . (2022). *Anodizado duro*. Obtenido de <http://www.anesdur.com/anodizado-tecnico-industrial/anodizado-duro.html#:~:text=El%20anodizado%20es%20un%20proceso,forma%20parte%20del%20p,ropio%20metal>.
- [6]. Anillo Muñoz, P. (2017). *Diseño de instalaciones para anodizado tartárico de piezas de aleación de alumnio*. Cádiz: Universidad de Cádiz.
- [7]. Avalos Yépez, J. (2014). *Estudio de alternativas para la sustitución de acido crómico en el proceso de anodizado* . México: Cideteq.
- [8]. Baltierra Costeria, G., & Garcia Lora , A. M. (2017). *Recubrimientos: Protección de superficie por la tecnica de anodizado* . Coahuila: Universidad autónoma de Coahuila.
- [9]. Bautermic, S.A. (2022). *Máquinas de lavado y desengrasado de piezas*. Obtenido de Limpieza y desengrase industrial: para el posterior montaje de las piezas o para un tratamiento superficial de acabado: <https://www.interempresas.net/MetalMecanica/FeriaVirtual/Producto-Limpieza-y-desengrase-industrial-43097.html>
- [10]. BONILLA LEMUS, D. F. (2015). *Caracterización mecanica y eléctrica de la aleacion de aluminio 6201 de uso en la fabricacion de cables eléctricos*. Cali: universidad de San Buenaventura.
- [11]. Brightstar Aluminium Machinery . (Abril de 2022). *Brightstar Aluminium Machinery* . Obtenido de <https://www.brightstaralu.com/es/product/automatic-aluminum-profile-polishing-machine/>
- [12]. Colorante Sandoz. (1964). *Sandos "Dyed Aluminium" 0177/71*. Suiza.
- [13]. CPA Corantes e Produtos para Anodização de Aluminio. (2022). *Anodizado. Diadema - SP*.

- [14]. CYM Materiales, soluciones industriales . (2022). *CYM Materiales, soluciones industriales* . Obtenido de el óxido de aluminio (AL₂O₃) o alúmina es una sustancia cristalina sintética producida a partir de bauxita, un mineral natural.: <https://cym.com.ar/productos/%C3%B3xido-de-aluminio/>
- [15]. Duran & Huguenin. (1964). *Orminal 4n* . Suecia .
- [16]. Echavarría V, A., & Orrego P, G. A. (2017). *Metalurgia asica de algunas aleaciones del alumnio extruidad o laminadas*. Medellín: Univeridad de Antiquia.
- [17]. Fitzgerald , R. W. (1996). *Mecanica de materiales*. Mexico: Alfaomega.
- [18]. Garcés, F., Acquaroli, L., & Arce, R. (2010). Fabricación y caracterización de nanoporos ordenados de Al₂O₃ obtenidos por anodización electroquímica del aluminio. *Asociación Argentina de Materiales*, 19-27.
- [19]. Garcia Rueda, F. C. (2018). *Recubrimientos anodizados duros y electropolimerizados mediante potencial pulsado para aplicaciones aeronauticas* . México: Centro de investigacion y desarrollo tecnologico en electroquimica .
- [20]. GIFFIN: Soluciones avanzadas de acabados de superficie . (2022). *Proceso de anodizado y recubrimiento médiate líneas de tanques*. Obtenido de <https://giffininc.com/es/productos/tecnologias-aeroespaciales/lineas-de-proceso-de-tanques-de-anodizado-y-galvanoplastia/>
- [21]. Gludice, C., & Pereyra, A. (?). *Proteccion de materiales* . La Plata: Universidad Tecnológica Nacional .
- [22]. Gómez Villamil , O. L. (2019). *Estandarización de un proceso de anodizado implementado por la empresa Allegion Colombia S.A.S*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad de Ciencias y Educación.
- [23]. Green power. (2022). *Rectifier R and D and manufacturer DC power supply solutions*. Obtenido de Rectificador para anodizar aluminio 8000A 20V: <http://www.gprectifier-es.com/dc-power-supply/power-supply-for-electroplating/rectifier-for-anodizing-aluminium-8000a-20v.html>
- [24]. Group, K. (2020). *Aleaciones de aluminio alambre y bobina cortados a medida*. Reino unido : KNIGHT Group.
- [25]. Grupo austromex. (2022). *Rueda de felpa* . Obtenido de <https://www.austromex.com.mx/detalle/2306>
- [26]. Interactiva anodizing. (2019). *Green E-AEN*. E.U.A.
- [27]. Knight group. (2020). *Aleaciones de alumnio; alambre y bobina cortada a medida*. . Reino Unido : Knight group.
- [28]. Linetec single source solution for architectural finishing. (2022). *AAMA specifications for anodize*. Obtenido de <https://linetec.com/anodize/aama-specifications/>

- [29]. Norton Saint-Gobain. (25 de Enero de 2022). *Norton Saint-Gobain:¿Cuáles son los tipos y grosores de lijas?* (SGA-PE-Marketing, Productor) Obtenido de <https://www.nortonabrasives.com/es-pe/blog/cuales-son-los-tipos-y-grosos-de-lijas>
- [30]. Organización Internacional de Normalización. (2010). *Anodización del aluminio y sus aleaciones. Especificaciones generales para recubrimientos de oxidación anódica sobre aluminio. (ISO 7599:2010)*. Organización Internacional de Normalización.
- [31]. Osborn . (2022). *Osborn*. Obtenido de Solid compounds: <https://www.osborn.com/en/solid-compounds/category/EUPSSC>
- [32]. Paredes, J. (2010). El uso de la anodización de materiales . *Casa del tiempo*, 59-65.
- [33]. Possehl. (20 de Abril de 2020). *Possehl*. Obtenido de BAUXITA CALCINADA: <https://acortar.link/FZHyQV>
- [34]. Products Finishing. (2018 de Noviembre de 2018). *Products Finishing*. Obtenido de <https://www.pf-mex.com/articulos/anodizado-de-aluminio>
- [35]. quiminet. (04 de Septiembre de 2020). *quiminet: Las pastas ideales para el pulido y abrillantado de metales*. Obtenido de <https://www.quiminet.com/articulos/las-pastas-ideales-para-el-pulido-y-abrillantado-de-metales-4470630.htm>
- [36]. Ramón Lagos, & Juan Camus. (2017). Anodizado y coloreado de obras de arte de aluminio y sus aleaciones. *Cubana Quím, Vol. 29, no.3*, 406-417.
- [37]. Rivera Villagomez , Y., & Jacobo Luna, O. (2005). *Manual de operacion del area de anodizado de una planta de alumnio en el estado de méxico*. Mexico: Universidad Nacional Autonoma de México.
- [38]. Secretaria de economia . (2020). NMX-W-121-SCFI-2020 Aluminio y sus aleaciones-Anodizado-Evaluación de la calidad del sellado de la capa anódica por medición de la admitancia.
- [39]. Secretaria de economia. (2004). NMX-W-138-SCFI-2004 metales no ferrosos-aluminio y sus aleaciones-anodizacion-recubrimientos de oxido anodico en aluminio-especificaciones generales.
- [40]. Secretaria de economia. (2015). NMX-W-169-SCFI-2015 aluminio y sus aleaciones-fundición-aluminio de primera fusión aleado para fundición-sistema de clasificación y designación. México.
- [41]. Secretaria de economia. (2016). NMX-W-119-SCFI-2016 Aluminio y sus aleaciones-Anodizado-Determinación del espesor de recubrimientos de óxido anódico-Medición no destructiva por microscopio de haz dividido.
- [42]. Secretaria de economia. (2016). NMX-W-127-SCFI-2016 Aluminio y sus aleaciones-Anodizado-Recubrimientos de óxido anódico coloreados-Resistencia a la decoloración por la luz ultravioleta-Método comparativo de prueba.
- [43]. Silva Escalona, C. (1981). *Manual de anodizado*. Mexico: Tesis UNAM.

- [44]. Teknika4. (3 de Abril de 2022). Obtenido de ALUMINIO 1100: <https://www.teknika4.com/es/aluminio-1100>
- [45]. Tenazit. (2022). *Rueda de sisal (Clave 1618)*. Obtenido de <https://www.austromex.com.mx/ficha/v/1618>
- [46]. Tenazit. (2022). *Rueda de tela verde (Clave 1619)*. Obtenido de Tenazit: <https://www.austromex.com.mx/ficha/v/1619>
- [47]. TEPSA. (2022). *Racks de titanio para anodizado*. Obtenido de <http://www.titanioyequiposdeproceso.com/racks.html>
- [48]. thomasnet. (2020). *thomasnet*. Obtenido de Temper Designations for Aluminum Alloys: <https://www.thomasnet.com/articles/metals-metal-products/temper-designations-for-aluminum-alloys/#:~:text=The%20temper%20designation%20system%20adopted,to%20produce%20the%20various%20tempers.>
- [49]. Torres Vázquez , A. (27 de Agosto de 2019). *reaxsol: Ruedas de tela*. Obtenido de <https://www.reaxsol.com/2019/08/27/ruedas-de-tela/>
- [50]. United States military . (2003). *MIL-A-8625F: Anodic coatings for aluminum and aluminum alloys* . United States.
- [51]. Vargas Hernández, C., & Jiménez G, F. N. (2007). Crecimiento de películas de óxido de aluminio por métodos. *Scientia et Technica Año XIII, No 34*, 545-550.
- [52]. VSM abrasivos. (2022). *VSM abrasivos*. Obtenido de Carburo de silicio: historia y propiedades: <https://vsmabrasivos.com/carburo-de-silicio/#:~:text=Formas%20del%20Carburo%20de%20Silicio&text=Es%20un%20material%20Orefractario%20con,para%20desbaste,%20corte%20y%20pulido>
- [53]. Zamora Jiménez, A. (2017). *Protrcción superficial de alumnio mediante recubrimientos nanoestructurados* . Cartagena: Universidad politecnica de Cartagena.

Anexo 1

ASTM B580-79: Especificación estándar para recubrimientos de óxido anódico en aluminio

Superficie significativa

Son las características que normalmente son visibles, además de ser la encargada de dar la apariencia al material como se muestra en la tabla 18, sin embargo, pueden ver afectadas principalmente por algún fenómeno de corrosión.

Para cumplir con la norma ASTM B580-79 la apariencia debe corresponder principalmente en 2 factores, en el color y en el acabado (brillante, opaco, satinado), a partir de una muestra tratada denominada estándar.

Tabla 18 Definiciones de condiciones de servicio y ejemplos de aplicaciones típicas y tipos de recubrimiento aplicables [39]

SC No.	Definición	Aplicaciones Típicas
Muy grave (5)	Exposición a la intemperie atmosférica que se puede esperar que se prolongue durante muchos años o a condiciones prolongadas de desgaste por cargas elevadas.	Fachadas arquitectónicas exteriores sin mantenimiento, piezas de maquinaria, marina
severo (4)	Exposición que incluye daños probables por abolladuras, rasguños y desgaste abrasivo junto con ambientes corrosivos.	1-Automoción—exterior, 2-fachadas exteriores arquitectónicas mantenidas, ventanas
Moderado (3)	Exposición que probablemente incluya humectación ocasional con recubrimiento sujeto a desgaste o abrasión moderados.	Reflectores de iluminación: exterior, equipos deportivos, electrodomésticos, placas de identificación, muebles de jardín
leve (2)	Exposición en interiores en atmósferas normalmente secas con revestimiento sujeto a mínimo desgaste o abrasión.	Automoción: interior, artículos para el hogar, reflectores de iluminación, cerrados
Condición de grieta (1)	Exposición a ambientes húmedos con poca o ninguna condición abrasiva. Particularmente para juntas de regazo.	Ensamblajes soldados por puntos o remachados como aviones y componentes electrónicos.

ISO 7599:2010: Anodización del aluminio y sus aleaciones. Especificaciones generales para recubrimientos de oxidación anódica sobre aluminio.

El objetivo principal es buscar establecer las características mínimas para los recubrimientos de óxido de aluminio, además de verificar las propiedades mínimas para el cumplimiento establecido, a partir de las necesidades del usuario, así como asegurar la calidad en la apariencia de recubrimiento, como la textura de la superficie.

Dentro de la norma ISO, existe una serie de clasificaciones, así como una serie de especificaciones, siendo una de esta la clasificación a partir de los espesores de la película protectora ya que esta clasificación permite determinar y seleccionar el giro o uso se le puede dar a este recubrimiento.

Otro parámetro que se debe tomar en cuenta y que permite realizar otro tipo de clasificación, son las especificaciones, debido a que permite hacer una categorización a partir de las especificaciones:

- Apariencia: el color del recubrimiento, brillo.
- Resistencia a la abrasión, resistencia a la corrosión.
- Potencial eléctrico de ruptura.

Otro tipo de clasificación y de las más recurridas, es a partir de la calidad:

- Calidad arquitectónica
- Calidad decorativa
- Calidad brillante

Todas estas características se deberán cumplir para dar certeza al comprador un producto de calidad.

ASTM B638: Método de prueba estándar para la prueba de niebla salina con ácido acético acelerado con cobre.

La norma ASTM B638, busca establecer el procedimiento, como los equipos e instrumentos a utilizar para poder llevar a cabo la prueba de atomización con ácido acético.

El alcance que tiene la norma, no solo es para recubrimientos anódicos, sino también es aplicable para recubrimientos en diferentes materiales, como son recubrimientos decorativos de cobre, níquel, cromo, entre otros.

Para realizar la prueba es necesario contar con ciertas características, así como las soluciones utilizadas en el procedimiento, para garantizar que la prueba sea lo más representativa posible, así como evitar falsos positivos, al momento de realizar la

prueba se deberá contar con una solución de ácido acético con un pH entre 3.1 y 3.3, además al momento de colocar la solución en el quipo, esta deberá ser filtrada previamente.

El equipo deberá contar con una serie de características mínimas para poder garantizar la fiabilidad de la prueba, para realizar la prueba con ácido acético deberá de contar con un gabinete resistente a la corrosión o un ataque químico, así como una capacidad mínima de 0.2m³, sin embargo se recomienda una capacidad de 0.4m³, para una mayor y mejor distribución del atomizado, se debe de contar con un termostato, ya que el mantener la temperatura constante en la operación de la prueba, pues esta debe estar en 50°C ± 2°C, además la solución deberá de ser atomizada a una presión de entre 70 y 170 kpa a una velocidad de 10 a 20/80cm²/hora, durante un tiempo de exposición de 2 a 720 h.

La determinación, así como el dictamen de la prueba se deberá realizar de manera visual, ya que no deberá existir en ningún momento presencia de corrosión al realizar una inspección.

NMX-W-127-SCFI-2016: Aluminio y sus aleaciones-Anodizado-Recubrimientos de óxido anódico coloreados-Resistencia a la decoloración por la luz ultravioleta-Método comparativo de prueba.

La norma NMX-W-127-SCFI-2016, tiene como objetivo establecer el procedimiento de un método comparativo para la determinación de la resistencia de un recubrimiento teñido a la decoración por la explosión a una fuente de luz ultravioleta, buscando simular la exposición al ambiente y principalmente a la luz solar.

Los equipos deben de cumplir una serie de características, ya que este consiste de un gabinete hecho a partir de materiales resistente a una fuente de luz ultravioleta, así como al calor generado durante la prueba, principalmente de la fuente de luz, además de mantener la misma distancia entre las especies. Las lámparas ultravioletas, deberá ser una lámpara de arco de mercurio de presión media con una cobertura de sílice, la lampará UV, no debe de estar cubierta de vidrio, ya que el vidrio elimina la mayor parte de la luz ultravioleta emitida.

La intensidad de la lámpara deberá de ser aproximadamente las que se muestran a continuación, además de existir una distancia de 2 cm de su centro.

Tabla 19 Intensidades aproximadas de luz UV a 2cm del centro de la lámpara [42]

Longitud de onda nm	Intensidad $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
254	500 a 150
265	800 a 400
297	600 a 400
303	1000 a 800
313	1 350 a 1 200
365	1 500 a 1 700
405	800 a 1 000
436	1 300 a 1 600

NOM-W-119-SCFI-2016: Aluminio y sus aleaciones-Anodizado-Determinación del espesor de recubrimientos de óxido anódico-Medición no destructiva por microscopio de haz dividido.

Se busca determinar el método mediante el cual se realizará la medición del espesor del recubrimiento anódico, a partir de una prueba no destructiva utilizando un microscopio de haz dividido, sin embargo, este procedimiento solo es aplicable para espesores mayores a los 10 μm

El equipo a utilizar será un microscopio de haz de luz dividido el cual deberá de ser diseñado específicamente para la prueba, principalmente para recubrimientos transparentes o rugosidad superficial

Para poder dar un dictamen se deberá hacer al menos 10 mediciones en la misma pieza en diferentes puntos, posteriormente se deberá hacer una media aritmética. Para considerar que un valor esta fuera de especificación o anómalo deberá estar un $\pm 10\%$ de la media aritmética, a su vez si más del 30% de los valores de la prueba son anómalos, el dictamen será considerado como prueba no conforme.

