PROYECTO FIN DE MÁSTER

“PUESTA A PUNTO DE UN EQUIPO DE ANODIZADO PARA ALEACIONES DE ALUMINIO”

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación

Alumno: Javier Vélez Leache
Director: Carlos Berlanga Labari
Codirector: Javier Pérez Ilzarbe
Pamplona, 12 de Septiembre de 2014

NOTA IMPORTANTE DEL DIRECTOR DEL TRABAJO:

Como director de este trabajo fin de máster, tengo que precisar la siguiente cuestión sobre la dirección de este trabajo. Según consta en la portada de este documento, el director de este trabajo soy yo mientras que como codirector aparece el Dr. Javier Pérez-Ilzarbe.

Tengo que aclarar que el verdadero director ha sido el Dr. Javier Pérez-Ilzarbe y sólo por cuestiones reglamentarias no ha sido posible que aparezca como tal. Quiero dejar claro que el Dr. Javier Pérez-Ilzarbe ha sido quién ha llevado en todo momento el peso de la dirección del trabajo, dedicando mucho tiempo y esfuerzo para dar los pasos oportunos para realizar este trabajo.

Por otra parte, como director académico del máster de Ingeniería de Materiales y Fabricación, agradezco sinceramente a Javier su desinteresada dedicación para dirigir este trabajo fin de máster. Es obvio que sin su conocimiento sobre el proceso de anodizado basado en su experiencia de muchos años en el mundo de la industria del aluminio, hubiera sido imposible realizar este trabajo.

Fdo: Dr. Carlos Berlanga Labari

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar me gustaría agradecer tanto al tutor de este Proyecto fin de Máster, Dr. Carlos Berlanga Labari, como al Departamento de Ingeniería Mecánica, Energética y de Materiales por su acogida y la disponibilidad de ofrecerme todas las facilidades y medios suficientes con el fin de poder desarrollar de la mejor manera posible mi labor durante este período.

Por otra parte agradecer al profesor de ingeniería eléctrica Vicente Senosiáin por realizar la instalación del rectificador y con ello hacer posible la realización de este trabajo.

Finalmente, debo un especial reconocimiento a Javier Pérez-Ilzarbe por su orientación, apoyo y participación activa en el desarrollo de este trabajo con un interés que ha sobrepasado todas las expectativas. Destacar sobre todo su disponibilidad, paciencia y generosidad para compartir conocimientos y experiencias profesionales. No cabe duda que su participación ha enriquecido el trabajo realizado.

Índice

1. OBJETIVO 13

2. EL ALUMINIO. OBTENCIÓN INDUSTRIAL 13
2.1. Historia del aluminio 13
2.2. Menas. La bauxita 15
2.3. Obtención del óxido de aluminio (Proceso Bayer) 15
2.4. La electrolisis de la alúmina 16
2.5. La fundición en las plantas de electrolisis del aluminio 17
2.6. Colada continua y semicontinua 17
2.6.1. Colada de placas y tochos 17
2.6.2. Colada de lingotes 18
2.6.3. Homogeneizado de placas y tochos 18
2.7. Propiedades del aluminio 20

3. ALEACIONES DE ALUMINIO 21
3.1. Aleaciones para forja 22
3.2. Aleaciones para moldeo 23

4. MÉTODOS DE ELABORACIÓN DE PRODUCTOS DE ALUMINIO 25
4.1. Laminación 25
4.1.1. Laminación en caliente y colada continua 25
4.1.2. Laminación en frío 26
4.2. Extrusión 27
4.3. Estirado y trefilado 27
4.4. Fundición y moldeo 28
4.5. Mecanizado 29
4.6. Soldadura 30

5. APLICACIONES DEL ALUMINIO 32
5.1. Envase y embalaje 32
5.2. Electricidad 33
5.3. Aeronáutica y automoción 33
5.4. Utensilios de cocina 34
5.5. Construcción 34
5.6. Industria naval 35

6. RECICLADO 36

7. TRATAMIENTOS SUPERFICIALES 37
7.1. Recubrimientos químicos de óxido (conversión) 37
7.2. El anodizado. Generalidades 38
7.2.1. Propiedades del anodizado 39

7.2.2. Ideas básicas sobre el proceso de anodizado 40
7.2.3. Aspectos teóricos de la anodización 41
7.2.4. La práctica del anodizado 44
7.2.4.1. Preparación de la superficie 44
7.2.4.2. Características y condiciones de la cuba de anodizado 46
7.2.5. Tipos de electrolitos 47
7.2.6. Otros electrolitos 49
7.2.7. Coloreado de la capa anódica 50
7.2.7.1. Coloreado por absorción 51
7.2.7.2. Electrocoloración 51
7.2.8. Sellado 52
7.2.9. Lacado o pintado 56

8. PARTE EXPERIMENTAL 57
8.1. Planteamiento previo 57
8.2. Descripción del equipo de anodizado 57
8.2.1. Rectificador 57
8.2.2. Cuba electrolítica 59
8.3. Diseño y construcción del embarrado, ánodo y cátodo 60
8.3.1. Implementación de la cuba con ánodo y cátodo 61
8.3.2. Muestras a anodizar 62
8.4. Preparación y cálculos del proceso 64
8.4.1. Preparación de la solución de ácido sulfúrico 64
8.4.2. Cálculo de la corriente aplicada 65
8.4.3. Preparación de la superficie 66
8.5. Realización anodizado 68
8.5.1. Capa de óxido de Clase AA 10 68
8.5.2. Capa de óxido de Clase AA 15 69
8.5.3. Capa de óxido de Clase AA 20 69
8.6. Sellado 69
8.7. Ensayos 72
8.7.1. Medida del espesor por corrientes inducidas (ISO 2360) 72
8.7.1.1. Principio del método 72
8.7.1.2. Instrumento: Medidor de espesores 73
8.7.1.3. Resultados de medidas con el instrumento de medición de espesor 75
8.7.2. Medida del espesor por corte micrográfico (ISO 1463) 77
8.7.2.1. Principio del método 77
8.7.2.2. Equipos 77
a) Equipo de encapsular 77
b) Pulidora automática 79
c) Microscopio óptico 81
8.7.2.3. Resultados de medidas con el microscopio óptico 81

8.7.3. Estimación de la pérdida de poder absorbente del recubrimiento anódico (ISO 2143) 84
8.7.3.1. Principio del método 84
8.7.3.2. Procedimiento operativo 85
8.7.3.3. Resultados 86
8.7.4. Evaluación de la calidad del sellado del recubrimiento anódico por pérdida de masa (ISO 3210) 88
8.7.4.1. Principio del método 88
8.7.4.2. Procedimiento operativo 88
8.7.4.3. Instrumento: Balanza analítica 89
8.7.4.4. Resultados 90
8.7.5. Determinación de la masa del recubrimiento anódico (ISO 2106) 91
8.7.5.1. Principio del método 91
8.7.5.2. Procedimiento operativo 91
8.7.5.3. Resultados 92
8.7.6. Ensayo de corrosión en atmósferas artificiales (ISO 6988) 95
8.7.6.1. Principio del método 95
8.7.6.2. Proceso operativo 96
8.7.6.3. Equipo: Equipo de ensayo de corrosión 96
8.7.6.4. Resultados 97

9. CONCLUSIONES 104

10. BIBLIOGRAFÍA, NORMAS Y REFERENCIAS 105

11. ANEXOS 107
Anexo 1 108
Anexo 2 137
Anexo 3 158

Listado de figuras.

Figura 2.1	*Sir Humphrey Davy propuso para el nuevo metal el nombre de aluminum*
Figura 2.2	*Hans Christian Ørsted (izquierda) y Friedrich Wöhler (derecha), autores del primer gran avance para la obtención del aluminio*
Figura 2.3	*Paul Héroult (izquierda) y Charles Martin Hall (derecha) patentaron un procedimiento de extracción de aluminio muy novedoso*
Figura 2.4	*Esquema del proceso Bayer*
Figura 2.5	*Esquema de una cuba de electrolisis*
Figura 2.6	*Máquina de colada continua para placas o tochos*
Figura 2.7	*Cadena lingotera*
Figura 2.8	*Diferencia de ciclos térmicos de homogeneización entre un horno continuo y otro discontinuo*
Figura 2.9	*Esquema de un horno de homogeneización continuo*
Figura 3.1	*Esquema de las principales aleaciones de aluminio*
Figura 3.2	*Edificio de la central de la empresa ALCOA en Pittsburgh*
Figura 3.3	*Familias de aleaciones de aluminio para moldeo según la Norma EN 1706:2010. Aluminio y aleaciones de aluminio. Piezas moldeadas. Composición química y características mecánicas*
Figura 4.1	*Comparación de los procesos de laminación en caliente y de colada continua*
Figura 4.2	*Representación del proceso de laminación en laminador dúo (esquema y fotografía)*
Figura 4.3	*Representación del proceso de extrusión y perfiles de aluminio extruido*
Figura 4.4	*Sección de una hilera de tracción o estirado*
Figura 4.5	*Forma de una hilera*
Figura 4.6	*Pistón de motor (izquierda) y cabeza de un aerogenerador (derecha)*

Figura 4.7	*Esquema de la soldadura sistema TIG*
Figura 4.8	*Esquema de la soldadura sistema MIG*
Figura 5.1	*Envases (izquierda) y latas de aluminio (derecha)*
Figura 5.2	*Aplicación en un tendido eléctrico*
Figura 5.3	*Aplicación de aluminio en aeronáutica y automoción*
Figura 5.4	*Aplicación en diferentes utensilios de cocina*
Figura 5.5	*Ventana fabricada con aluminio y fachada con revestimiento de aluminio*
Figura 5.6	*Puente construido de aluminio*
Figura 5.7	*Paquebote "France" (izquierda) y superestructura totalmente en aluminio del "Ciudad de Formosa" (derecha)*
Figura 6.1	*Chatarra de aluminio comprimida*
Figura 7.1	*Diagrama del proceso de electrolisis*
Figura 7.2	*Representación de la aparición de poros en la capa de óxido de aluminio*
Figura 7.3	*Representación del campo esférico formado alrededor de un poro*
Figura 7.4	*Representación del crecimiento del poro*
Figura 7.5	*Representación de la superficie de aluminio tras el anodizado*
Figura 7.6	*Representación de la red que forman las celdas de óxido*
Figura 7.7	*Representación de las celdas hexagonales después de la transformación*
Figura 7.8	*Esquema del proceso de limpieza (izquierda) y distribución de las cubas continuas (derecha)*
Figura 7.9	*Representación esquemática de un corte de una cuba de anodizado*
Figura 7.10	*Diferentes tipos de ganchos o pinzas para anodizar*
Figura 7.11	*Características de los principales procesos industriales de anodizado*
Figura 7.12	*Gráfico que demuestra la influencia de la densidad de corriente en función del contenido de aluminio*
Figura 7.13	*Características de otros procesos industriales de anodizado*

Figura 7.14	*Representación esquemática del coloreado por absorción de colorante orgánico o sales metálicas*
Figura 7.15	*Variación del tono de color en la capa en función del espesor y el número de partículas depositadas*
Figura 7.16	*Gráfica en la que se muestra la influencia del tiempo y el voltaje en la obtención de diferentes colores o tonos en la electrocoloración de la capa anódica*
Figura 7.17	*Representación esquemática del proceso de sellado en su dirección preferente. O es la pared de un poro sin sellar mientras que I, II y III son pasos sucesivos del sellado*
Figura 7.18	*Gráfica que muestra la evolución de la proporción de sellado en función del tiempo*
Figura 8.1	*Tabla de espesor medio mínimo y espesor local mínimo*
Figura 8.2	*Equipo rectificador*
Figura 8.3	*Medidores incorporados al rectificador*
Figura 8.4	*Nuevo medidor adaptado al equipo*
Figura 8.5	*Imagen en la que se muestra la cuba y el sistema de refrigeración en su interior*
Figura 8.6	*Composición del aluminio 1050 utilizado en el embarrado, cátodos, ánodo y en las muestras a anodizar*
Figura 8.7	*Esquema del sistema diseñado para el anodizado*
Figura 8.8	*Fotografía de las partes del embarrado de las cuales colgarán el ánodo y los cátodos*
Figura 8.9	*Detalle de la unión correspondiente al embarrado donde conecta la pinza (izquierda) y unión de los cátodos verticales (derecha)*
Figura 8.10	*Cuatro de las muestras que serán anodizadas*
Figura 8.11	*Fotografías de la pinza de sujeción y contacto sin muestra a anodizar (izquierda) y con muestra a anodizar (derecha)*

Figura 8.12	*Fotografía que muestra la disposición en la que quedarán las piezas a anodizar dentro de la cuba*
Figura 8.13	*Estado final del diseño obtenido para la estructura del ánodo y cátodo*
Figura 8.14	*Imagen de la realización del desengrase*
Figura 8.15	*Imagen de la realización del ataque cáustico sobre las piezas*
Figura 8.16	*Tabla de parámetros para la realización del anodizado*
Figura 8.17	*Tabla que indica el tiempo de anodizado*
Figura 8.18	*Tabla que indica el tiempo de anodizado*
Figura 8.19	*Tabla que muestra el tiempo de anodizado*
Figura 8.20	*Imagen de la realización del sellado*
Figura 8.21	*Instrumento utilizado para controlar el pH*
Figura 8.22	*Tiempo del sellado sobre las piezas en las tres series*
Figura 8.23	*Imagen del instrumento utilizado para la medición de espesores*
Figura 8.24	*Imagen de la sonda en contacto con la muestra de aluminio*
Figura 8.25	*Placas base que se pueden utilizar para realizar la calibración del instrumento*
Figura 8.26	*Imagen del film de plástico que colocado sobre la placa base sirve para calibrar el instrumento*
Figura 8.27	*Tabla que muestra las medidas de espesor en micrómetros en muestras de Clase AA 10*
Figura 8.28	*Tabla que indica las medidas de espesor en micrómetros en muestras de Clase AA 15*
Figura 8.29	*Tabla que muestra las medidas de espesor en micrómetros en muestras de Clase AA 20*
Figura 8.30	*Equipo de encapsulado*
Figura 8.31	*Imagen de la cavidad donde se introduce la muestra así como los muelles utilizados para sujetarla en posición vertical*
Figura 8.32	*Imagen de la pieza encapsulada*
Figura 8.33	*Imagen de lijas y paños de diamante*

Figura 8.34	*Polvo de diamante en forma de spray*
Figura 8.35	*Pulidora automática de la marca Struers LaboPol-5*
Figura 8.36	*Microscopio óptico*
Figura 8.37	*Imagen de la medida del espesor en cuatro puntos*
Figura 8.38	*Imagen de la medida del espesor en cuatro puntos*
Figura 8.39	*Imagen de la medida del espesor en cuatro puntos*
Figura 8.40	*Solución ácida A y colorante A utilizados en el ensayo*
Figura 8.41	*Tabla de interpretación de resultados del ensayo de la gota de colorante*
Figura 8.42	*Serie de imágenes donde se muestran los cuatro pasos correspondientes al ensayo realizado*
Figura 8.43	*Serie de imágenes que muestran los pasos llevados a cabo durante la realización del ensayo*
Figura 8.44	*Serie de imágenes en las cuales se muestran los pasos seguidos en el ensayo*
Figura 8.45	*Balanza analítica*
Figura 8.46	*Tabla que indica las sucesivas medidas de masa hasta un valor constante*
Figura 8.47	*Tabla que indica las sucesivas medidas de masa hasta un valor constante*
Figura 8.48	*Tabla que indica las sucesivas medidas de masa hasta un valor constante*
Figura 8.49	*Equipo utilizado para el ensayo de corrosión compuesto por la cámara y la fuente de dióxido de azufre*
Figura 8.50	*Colocación de las piezas en el interior de la cámara del equipo de corrosión*
Figura 8.51	*Serie de imágenes de las piezas tras el primer ciclo*
Figura 8.52	*Serie de imágenes de las piezas tras el segundo ciclo*
Figura 8.53	*Serie de imágenes de las piezas tras el tercer ciclo*
Figura 8.54	*Serie de imágenes de las piezas tras el cuarto ciclo*

Figura 8.55	*Serie de imágenes de las piezas tras el quinto ciclo*

1. Objetivo.

En este proyecto se va a realizar la anodización, en planta piloto de laboratorio, de muestras de aluminio de pequeñas dimensiones, sometiendo posteriormente estas muestras anodizadas a los ensayos exigidos por las normas ISO para este tratamiento de superficie.

2. El aluminio. Obtención industrial.

2.1. Historia del aluminio.

No fue hasta bien entrado el siglo XIX cuando se consiguió identificar el aluminio como elemento metálico ya que anteriormente no fue posible dado que los campos de la física y la química no estaban suficientemente desarrollados para una tarea de tanto nivel.
Aproximadamente entre 1808 y 1812 el inglés Humphrey Davy fue el primero en concentrar lo que él sospechaba que fuera el nuevo metal mezclado con el hierro que estaba presente en sus menas habituales. Davy (figura 2.1) nombró a este nuevo elemento "aluminum" derivado de la raíz "alum" (alumbre, sulfato de aluminio y potasio), sal que era ya conocida desde los antiguos egipcios por su uso en el teñido de las telas. Todavía se llama así en EEUU pero en Gran Bretaña y muchos otros países su escritura acaba en "ium" en inglés o "io" en español.

Figura 2.1: *Sir Humphrey Davy propuso para el nuevo metal el nombre de aluminum*

En el año 1825 se produjo un hecho de gran importancia ya que el físico danés Hans Christian Ørsted (figura 2.2) fue capaz de aislar por primera vez unas muestras bastante impuras de este nuevo metal. Fue un inicio prometedor y finalmente fue dos años más tarde cuando se consiguió el aislamiento total. El autor de este nuevo avance fue Friedrich Wöhler (figura 2.2).

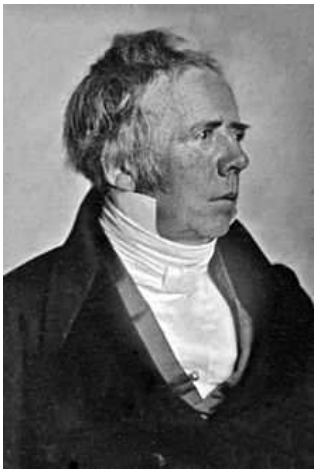


Figura 2.2: *Hans Christian Ørsted (izquierda) y Friedrich Wöhler (derecha), autores del primer gran avance para la obtención del aluminio*

Durante el propio siglo XIX la producción de aluminio era muy costosa debido a que su separación a partir del mineral en el que estaba contenido era realmente complicada. Una de las razones por las que el proceso de extracción de este metal era difícil residía en la elevada cantidad de energía necesaria para su obtención.

Sin embargo, en 1866 se desarrolló la dinamo. Se trataba de un generador eléctrico capaz de suministrar la cantidad de energía necesaria para realizar el proceso. Este hecho ayudó a perfeccionar las técnicas de extracción y como consecuencia se facilitó una producción más eficaz del aluminio como metal.

A finales del siglo continuaron las constantes mejoras en relación a la obtención de aluminio ya que en 1886, el francés Paul Héroult y el norteamericano Charles Martin Hall (figura 2.3) patentaron de manera independiente y simultánea un nuevo proceso de extracción del aluminio (actualmente se conoce como proceso Hall-Héroult).

Apenas tres años más tarde, en 1889, Karl Bayer descubrió y patentó una técnica para separar el óxido de aluminio a partir de la mena o roca natural en la que se encuentra, llamada bauxita.

Figura 2.3: *Paul Héroult (izquierda) y Charles Martin Hall (derecha) patentaron un procedimiento de extracción de aluminio muy novedoso*

Con todos estos avances aumentó en gran medida la producción de aluminio y los siguientes datos lo muestran. En 1882 la producción anual apenas alcanzaba las 2 toneladas y ya en el siglo XX la producción aumento vertiginosamente. En 1900 se alcanzó las 6.700 toneladas, en 1939 las 700.000 toneladas, en 1943 las 2.000.000 toneladas y en el año 2014 se espera que se produzcan 42.000.000 de toneladas. Hoy en día se trata del metal no férreo más producido.

2.2. Menas. La bauxita.

El aluminio es el tercer elemento más común encontrado en la naturaleza. Los compuestos de aluminio forman el 8% de la corteza de la tierra y se encuentran presentes en la mayoría de las rocas y de la vegetación, mientras que en estado natural se encuentra en muchos silicatos.
Como metal se extrae casi únicamente del mineral conocido con el nombre de bauxita (roca sedimentaria compuesta por óxidos de aluminio hidratados). La bauxita (recibe su nombre de la localidad francesa de Les Baux, donde fue extraída por primera vez) es un mineral rico en aluminio, donde entre un 20 y 30 % en masa es del material buscado y por tanto se trata de la materia prima de la cual se extrae el aluminio.
La bauxita se encuentra principalmente en los trópicos y en los países mediterráneos. Actualmente las principales explotaciones se encuentran en Latinoamérica, Australia, India y África.

2.3. Obtención del óxido de aluminio (Proceso Bayer).

La obtención del aluminio se realiza en dos fases: la primera la obtención de la alúmina a partir de la bauxita (proceso Bayer) y la segunda la separación del aluminio a partir de la alúmina mediante electrolisis. De modo orientativo se puede decir que con cuatro toneladas de bauxita se producen dos toneladas de alúmina y con estas dos toneladas de alúmina se obtiene finalmente una tonelada de aluminio.
La primera fase del proceso Bayer es la trituración de la bauxita. Posteriormente se disuelve ésta, a alta presión y temperatura en una solución de hidróxido de sodio.
Esta lejía sódica con hidróxido de aluminio disuelto se diluye con agua para obtener el hidróxido de aluminio sólido ya que en estas condiciones el hidróxido precipita. Posteriormente se deshidrata y calcina por calentamiento a alta temperatura, con lo que se obtiene el óxido de aluminio en forma de polvo fino.
El óxido de aluminio obtenido, que es la materia prima básica para la producción de aluminio, posee un punto de fusión muy alto (unos 2000 ºC) lo que hace difícil someterlo a la fase de electrolisis mencionada unas líneas más arriba. Para solucionar este problema se mezcla el óxido de aluminio obtenido con criolita (Na_3AlF_6) y fluoruro sódico, con lo que se consigue que el punto de fusión de la mezcla disminuya hasta los 900 ºC.

En la figura 2.4 se muestra un esquema del proceso Bayer.

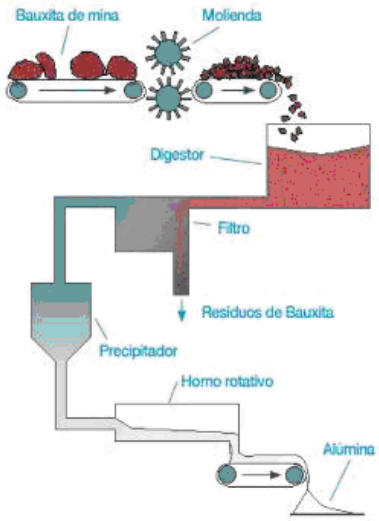


Figura 2.4: *Esquema del proceso Bayer*

2.4. La electrolisis de la alúmina.

La electrolisis es un proceso que permite separar los elementos de un compuesto por medio de la electricidad y la presencia de unos electrodos (ánodo y cátodo) conectados a la fuente eléctrica. El cátodo se forma con el aluminio fundido y el ánodo o ánodos son barras de pasta Söderberg, un producto parecido a la brea. Estamos acostumbrados a pensar en la electrolisis de soluciones acuosas como la que se produce para obtener los recubrimientos por galvanotecnia.
Para la obtención del aluminio se recurre a la electrolisis del óxido y sales en estado fundido. La actuación de la corriente eléctrica produce la descomposición de la alúmina en aluminio metálico en estado líquido que se deposita sobre el cátodo en el fondo de la cuba. En el ánodo se produce oxígeno que va quemando este electrodo.
En la figura 2.5 se muestra un esquema de una cuba electrolítica.

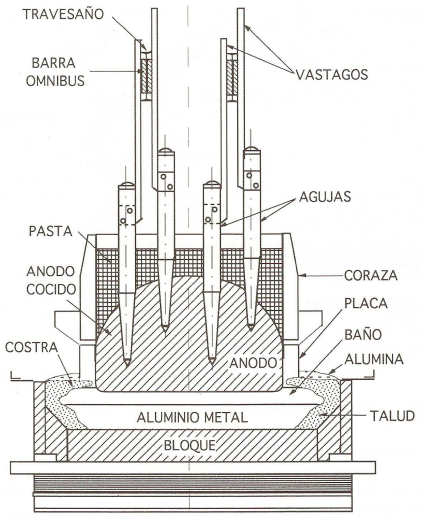


Figura 2.5: *Esquema de una cuba de electrolisis*

Evidentemente el diseño de las cubas de electrolisis ha evolucionado desde sus primeras versiones aumentando su tamaño e incorporando los avances del desarrollo tecnológico.
El aluminio obtenido tras este proceso tiene una pureza de entre 99,5 y 99,9 %.

2.5. La fundición en las plantas de electrolisis del aluminio.

Periódicamente el aluminio obtenido mediante electrolisis se extrae de las cubas por succión y se traslada a una sala de fundición donde el metal líquido es sometido a un tratamiento de desgasificado y sedimentación para una primera purificación.
En otros hornos se puede producir la aleación con otro u otros metales en busca de la composición más específica. En la fundición por tanto se realizan tratamientos del metal para adecuarlo en composición y formato con el objetivo de obtener el producto que se busca. Dentro de los aleantes que se suelen utilizar para conseguir buenas propiedades estructurales y conductoras, se encuentran los destinados a afinar el grano o los que producen un aumento de la conductividad eléctrica.
Otros tratamientos que se realizan pretenden variar no sólo su composición sino también su estructura para que el material pueda mejorar su comportamiento en su posterior tratamiento de deformación.

2.6. Colada continua y semicontinua.

Finalmente, el aluminio es transportado a otros hornos desde los cuales se pueden alimentar diferentes máquinas de colada (etapa de una fundición en donde se vierte el material fundido en un molde) para dar lugar generalmente a placas, tochos, lingotes e incluso banda o alambrón en el caso de algunas plantas.

2.6.1. Colada de placas y tochos.

En el caso de las placas una canaleta principal conduce el metal a uno o varios canales distribuidores que a su vez alimentan cada uno una placa. En cada canal distribuidor se encuentra un molde con la forma rectangular mediante el cual la placa adquiere finalmente la forma que se pretende conseguir. Las placas producidas de esta manera son utilizadas para laminación en caliente. También es ahora normal emplear placas como lingote de gran tamaño para ahorrar tiempo en la carga de los hornos.

En el caso de los tochos el procedimiento es el mismo que el explicado para la obtención de placas pero en este caso varían los moldes que ahora son circulares. En la producción de tochos la máquina de colar contiene lógicamente un número mayor de moldes que en la obtención de placas. A diferencia del caso anterior los tochos obtenidos son utilizados para extrusión de perfiles.

Para llevar a cabo ambos procesos se utilizan máquinas de colada semicontinua, de la cual se muestra una imagen en la figura 2.6.

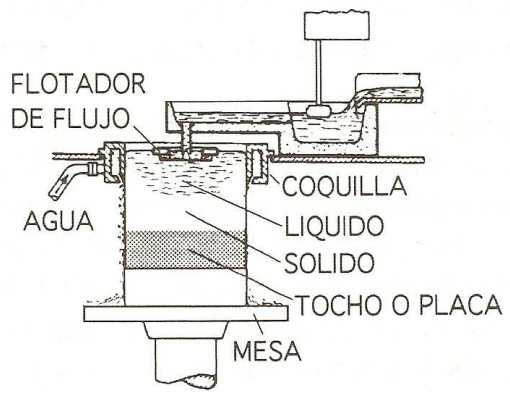


Figura 2.6: *Máquina de colada continua para placas o tochos*

En este esquema puede verse una sección de un molde para la producción de placas o tochos con el empleo de flotador. En la actualidad existen máquinas de colar en las que no se precisa el empleo de flotadores.

2.6.2. Colada de lingotes.

En el caso de los lingotes el sistema es diferente y el equipo recibe el nombre de cadena lingotera. En la figura 2.7 se muestra un esquema de una instalación de este tipo donde se puede apreciar como se vierte el metal en el molde y tras solidificar, los lingotes son apilados e incluso flejados en una máquina automática.

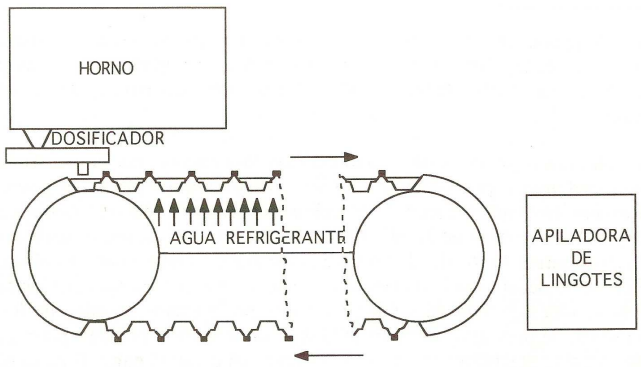


Figura 2.7: *Cadena lingotera*

2.6.3. Homogeneizado de placas y tochos.

Tanto las placas de laminación como los tochos de extrusión reciben normalmente un tratamiento de homogeneizado. En este tratamiento se producen transformaciones metalúrgicas tales como precipitaciones o cambios de fase para hacer de estos

productos semielaborados unos materiales con mejores características tanto para su proceso posterior como su empleo final.
Tradicionalmente se usaban hornos estáticos de homogeneización discontinuos, cámaras metálicas en los que se procedía al tratamiento de placas o tochos empleando convección forzada con el fin de que la distribución de temperaturas fuera lo más homogénea posible.
Sin embargo, recientemente se han desarrollado hornos de homogeneizado continuos con los cuales se ha conseguido mejorar el proceso. Con ellos las diferencias térmicas entre diferentes zonas del horno no existen, la productividad es mayor e incluso se consigue ahorro energético. En la figura 2.8 se muestra un gráfico donde se aprecian las diferencias en la curva de calentamiento entre un horno continuo y otro discontinuo.

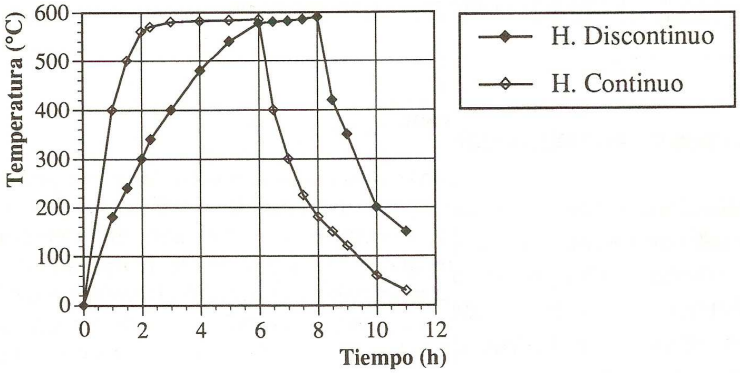


Figura 2.8: *Diferencia de ciclos térmicos de homogeneización entre un horno continuo y otro discontinuo*

La disposición de un horno continuo permite enlazar de forma continua la colada con el control de calidad y el empaquetado, tal y como se muestra en la figura 2.9.

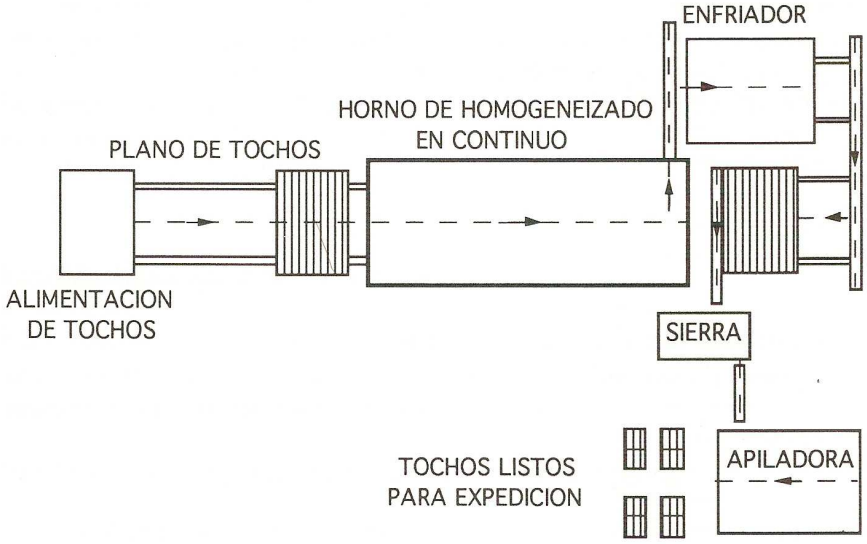


Figura 2.9: *Esquema de un horno de homogeneización continuo*

2.7. Propiedades del aluminio.

Ya que se trata del material no férreo más producido en la actualidad como se ha indicado al final del apartado 2.1, se deben tener en cuenta las características que posee dicho metal para ser el más destacado en su campo en este sentido.
Dentro de las características que posee el aluminio se va a resaltar aquellas que lo hacen más útil y justifican su enorme consumo en un gran número campos.

Se señala como su principal característica física que se trata de un metal ligero ya que su densidad de 2.700 kg/m^3 es baja en comparación con la mayoría de los metales, aproximadamente un tercio la del acero o el cobre.
También se debe destacar su bajo punto de fusión (en torno a 660 ºC).
A su vez es un buen conductor tanto térmico (80 a 230 W/(m·K)) como eléctrico (entre 35 y 38 $m/(\Omega\ mm^2)$) llegando a ser un 62 % de la conductividad eléctrica que posee el cobre patrón.

Dentro de las propiedades mecánicas su gran maleabilidad en frío permite producir láminas muy delgadas por laminación o alambres muy finos por trefilación.
Por otro lado su plasticidad en caliente permite obtener por extrusión perfiles de formas complicadas y paredes muy delgadas.
Además, su relativamente bajo punto de fusión y buena colabilidad lo hacen apto para la obtención de piezas moldeadas por los diferentes métodos de fundición (arena, coquilla, gravedad, a presión, vacío, etc.).
Es fácil de soldar, mecanizar o remachar como otros metales.
Con la adecuada aleación y tratamiento térmico puede dar lugar a productos con características mecánicas que equivalen a los aceros bajos en carbono.

El último ámbito que se va a tratar en cuanto a las características del aluminio es en el aspecto químico donde cabe destacar que el aluminio tiene un excelente comportamiento frente a la corrosión. Se trata de un metal que reacciona muy rápido con el oxígeno de la atmósfera, lo que deriva en la formación de una capa de alúmina (Al_2O_3). Esta capa impermeable y adherente recubre el material, y actúa como aislante y protector contra la acción de los agentes atmosféricos que puedan afectarle.
Esta fina capa natural de óxido puede transformarse en una capa más gruesa y resistente con el tratamiento de anodizado, tratamiento que es el objeto de este Proyecto.

3. Aleaciones de aluminio.

Como ya se ha explicado anteriormente en el apartado 2.5, es común alear el aluminio con otros metales para obtener diferentes características específicas. Los metales más utilizados en este tipo de aleaciones son magnesio, manganeso, cobre, zinc y silicio.
La figura 3.1 resume las diferentes familias de aleaciones a las que pueden dar lugar estos elementos bien sea con la intervención de dos elementos o tres.

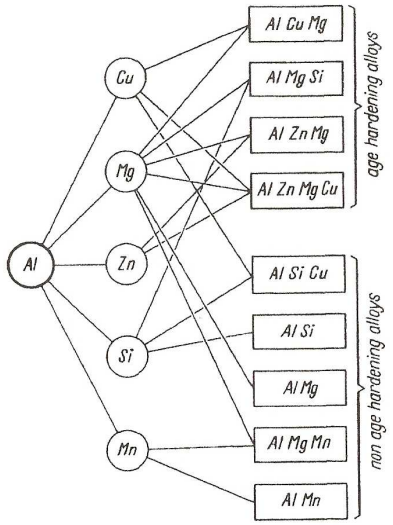


Figura 3.1: *Esquema de las principales aleaciones de aluminio*

Este esquema divide a las aleaciones de aluminio en aleaciones con y sin tratamiento de endurecimiento.
Haciendo un poco de historia una de las primeras aleaciones a partir del aluminio fue descubierta por el metalúrgico alemán Alfred Wilm. En 1911, Wilm precisa de la influencia del temple sobre la aleación de 3,5 % de Cu + 0,5 % de Mg y escribe: “La aleación queda blanda después del temple pero al cabo de unas horas la dureza aumenta, rápidamente al principio, después cada vez más lentamente”. La temperatura de temple de 500 ºC está indicada así como el aumento de resistencia y de alargamiento por maduración natural; la presencia de manganeso aumenta la dureza; el níquel aumenta la tenacidad; Wilm concluye: “La gran resistencia que se puede dar por este tratamiento a estas aleaciones les da la posibilidad de múltiples aplicaciones militares y aeronáuticas. Una de estas aleaciones es la conocida en el comercio con el nombre de duraluminio y parece que está llamada a tener un cierto porvenir”. Se debe aclarar que Duraluminio quiere decir “aluminio de Düren”, ciudad alemana donde fue fabricado por primera vez.

Dentro de las aleaciones del aluminio se puede diferenciar entre dos grupos, aleaciones para forja (entendiéndose como forja cualquiera de las operaciones de deformación plástica tales como laminación, extrusión o trefilado) y aleaciones para moldeo.

3.1. Aleaciones para forja.

Actualmente las aleaciones de aluminio para forja se clasifican en series, las cuales van desde la serie 1000 a la serie 8000. Esta clasificación está basada en las directrices de la Aluminum Association (USA) donde la denominación de cada aleación consta de cuatro dígitos. El primero de ellos indica la familia a la que pertenece la aleación y los tres dígitos que le siguen no tienen ningún significado especial, excepto en los aluminios puros de la familia 1000. En este caso los dos últimos dígitos representan, si le anteponemos la cifra 99 y una coma, la pureza del aluminio puro que representa. Así, aluminio 1050 designa a un aluminio de pureza mínima 99,50 %.
Su composición química viene regulada por la Norma UNE-EN 573-3 de Enero de 2014. En la Norma UNE-EN citada aparecen un gran número de aleaciones dentro de cada familia lo que alargaría el texto innecesariamente citarlas todas.
Se ha preferido describir de forma muy abreviada las características o propiedades de las diferentes familias de aluminios puros y aleaciones.

- Serie 1000: No se trata realmente de aleaciones sino de aluminio con presencia de impurezas de hierro o silicio, llamado aluminio comercialmente puro (hasta un 99,0 % de pureza). Su uso se centra para laminación en frío y sus características principales son tanto la buena resistencia a la corrosión como su buena conductividad eléctrica.
- Serie 2000: El principal aleante de esta serie es el cobre, siendo uno de los ejemplos el duraluminio. Con tratamientos térmicos es posible obtener buenas propiedades mecánicas siendo sus principales características la alta resistencia y alta tenacidad.
- Serie 3000: El principal aleante es el manganeso, cuyo efecto principal es la mejora de la resistencia a tracción del aluminio puro. Se utiliza para fabricar componentes con una resistencia a la tracción superior al aluminio puro teniendo como éste una gran resistencia a la corrosión.
- Serie 4000: El principal aleante es el silicio. Su principal característica es su alta resistencia pero cabe destacar que las aleaciones de esta serie no son apenas utilizadas. Estas aleaciones son muy poco utilizadas para la fabricación de placas o tochos pero una aplicación importante de las aleaciones aluminio-silicio es la fabricación de alambre que se utiliza como metal de aporte en la soldadura del aluminio. Años atrás se empleaban aleaciones de esta familia para obtener perfiles o bandas que después de anodizadas con electrolito de ácido sulfúrico ofrecían un color gris inalterable frente al efecto de la luz.

En la figura 3.2 se muestra una fotografía del edificio de la central de la empresa ALCOA (Aluminum Company Of America) en Pittsburgh (USA).

Figura 3.2: *Edificio de la central de la empresa ALCOA en Pittsburgh*

- Serie 5000: El principal aleante es el magnesio y a mayor contenido de este elemento se obtiene una resistencia creciente. Como propiedad principal se destaca su alta resistencia en función del contenido de magnesio y su excelente resistencia a la corrosión incluso en ambientes marinos. De ahí el empleo de estas aleaciones en la construcción naval.
- Serie 6000: Se utilizan como aleantes el silicio y el magnesio. Sus aleaciones poseen unas buenas propiedades mecánicas combinadas con una elevada resistencia a la corrosión. Su principal ventaja es que la mayoría de las aleaciones de esta serie son tratables térmicamente en la prensa de extrusión y posterior tratamiento de precipitación en horno. Responden bien al tratamiento de anodizado dando una capa anódica del mismo tono que el aluminio puro. Las aleaciones de esta serie son muy utilizadas en la producción de elementos destinados para la arquitectura, electrodomésticos e industria del automóvil.
- Serie 7000: El principal aleante es el zinc. Tienen una alta resistencia así como una gran dureza conforme mayor sea el contenido en zinc y algunas de sus aleaciones (las que poseen menor contenido en zinc) son tratables térmicamente en la prensa. Su uso más común es en la automoción o en elementos ferroviarios.
- Serie 8000: Esta serie contiene aleaciones con hierro y/o silicio como principales elementos de aleación. Unas de las aleaciones más utilizadas son los aluminios puros ricos en hierro y silicio como las 8011 u 8079 utilizadas en la fabricación de la hoja fina de aluminio o el impropiamente llamado “papel de aluminio”, cuando debería decirse hoja fina de aluminio. También es muy utilizada la 8006 para envases semi-rígdos y “fin stock” (bandas para aletas de refrigeración).

3.2. Aleaciones para moldeo.

En cuanto a las aleaciones de aluminio para moldeo cabe destacar que también se clasifican en series, en este caso desde la serie 21000 a la serie 71100, en razón de sus elementos de aleación. Su designación numérica contiene 5 dígitos y van precedidos de las siglas AC.

Se muestra en la figura 3.3 la tabla que contiene las familias de aleaciones que se citan en la Norma EN 1706:2010 con las designaciones numérica y simbólica. Esta última designación permite conocer de forma aproximada su composición química lo que no permitían las designaciones de la Aluminum Association (USA) de las aleaciones de forja.

Grupo de aleaciones	**Designación de la aleación**	
	Numérica	**Simbólica**
Al	.	Al 99,6E
	.	Al 99,7E
AlCu	EN AC-21000	ENAC-AlCu4MgTi
	EN AC-21100	EN AC- AlCu4Ti
	EN AC-21200	EN AC- AlCu4MgMn
AlSiMgTi	EN AC 41000	EN AC-AlSi2MgTi
AlSi7Mg	EN AC 42000	EN AC-AlSi7Mg
	EN AC 42100	EN AC-AlSi7Mg0,3
	EN AC 42200	EN AC-AlSi7Mg0,6
AlSi10Mg	EN AC 43000	EN AC-AlSi10Mg(a)
	EN AC 43100	EN AC-AlSi10Mg(b)
	EN AC 43200	ENAC-AlSi10Mg(Cu)
	EN AC 43300	EN AC- AlSi9Mg
	EN AC 43400	EN AC- AlSi10Mg(Fe)
	EN AC 43500	EN AC- AlSi10MnMg

Figura 3.3: *Familias de aleaciones de aluminio para moldeo según la Norma EN 1706:2010. Aluminio y aleaciones de aluminio. Piezas moldeadas. Composición química y características mecánicas*

Mirando esta tabla de la figura 3.3 se puede observar que los dos principales elementos de aleación, en varias aleaciones, son el cobre y el silicio. Este último elemento aporta a la aleación que lo contiene una bajada del rango de fusión y solidificación así como una buena colabilidad. La presencia simultánea de silicio y magnesio da la posibilidad de tratamiento térmico de endurecimiento a las aleaciones que contienen ambos elementos.

4. Métodos de elaboración de productos de aluminio.

Hay muchos procesos aplicables sobre el aluminio puro o sus aleaciones en relación a la obtención del producto que son comunes a la tecnología de muchos metales.

4.1. Laminación.

4.1.1. Laminación en caliente y colada continua.

Para poder llevar a cabo el proceso de laminación en caliente, el aluminio debe estar en forma de placa de laminación como bien ya se ha comentado previamente. La primera fase del proceso es el calentamiento de la placa a unos 500 ºC. El laminador en caliente es un equipo de gran tamaño (y de gran costo) que consta de uno o dos laminadores reversibles en "tándem" y mesas salida de gran longitud con uno o dos bobinadotes en sus extremos. El proceso consiste en el paso de la placa sucesivas veces, una vez en un sentido y la siguiente en otro, por el laminador o laminadores, que van reduciendo gradualmente su espesor hasta llegar a obtener una chapa de gran longitud y unos 5 mm de espesor, que puede ser ya bobinada.

Una alternativa a la laminación en caliente es la colada continua. Con este proceso es posible obtener banda para laminar haciendo pasar el aluminio líquido entre dos rodillos refrigerados interiormente con agua y recogiendo en un bobinador la banda que se va formando.

En la figura 4.1 se da de forma esquemática una comparación de los dos procesos.

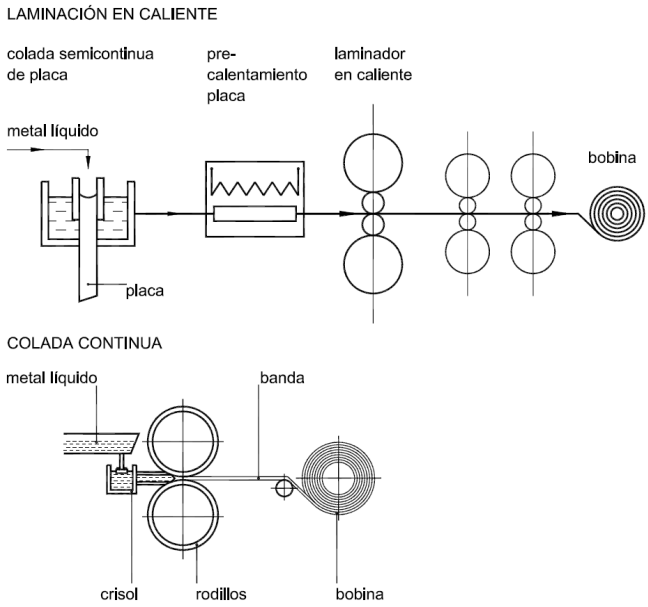


Figura 4.1: *Comparación de los procesos de laminación en caliente y de colada continua*

No todas las aleaciones pueden procesarse por colada continua ni pueden utilizarse las bandas de este proceso para aquellas aplicaciones que exijan gran calidad superficial o buena isotropía de propiedades.

4.1.2. Laminación en frío.

La banda producida en los laminadores en caliente pasa a ser procesada en los laminadores en frío.

En una planta que produzca hoja fina de aluminio ("foil") la banda gruesa que proviene de laminación en caliente o de colada continua, se lamina en un primer laminador de gran potencia para obtener bandas de espesor del orden de 0,6 mm. Esta banda se conoce con el nombre en inglés de "foil stock" o también "re-roll". Se puede seguir laminando a menores espesores hasta llegar aproximadamente a los 0,015 µm (micrómetros) procesando una sola banda en laminadores cuartos (dos cilindros de apoyo y dos de trabajo). Espesores inferiores se fabrican por laminación en "doblado" laminando simultáneamente dos hojas. Por este proceso es posible alcanzar incluso espesores finales de 0,005 mm (hoja fina para condensadores eléctricos).

Esto obliga a llevar a cabo la operación final de separado de la hoja doble en dos bobinas. La hoja fina obtenida tiene una cara brillante y otra mate.

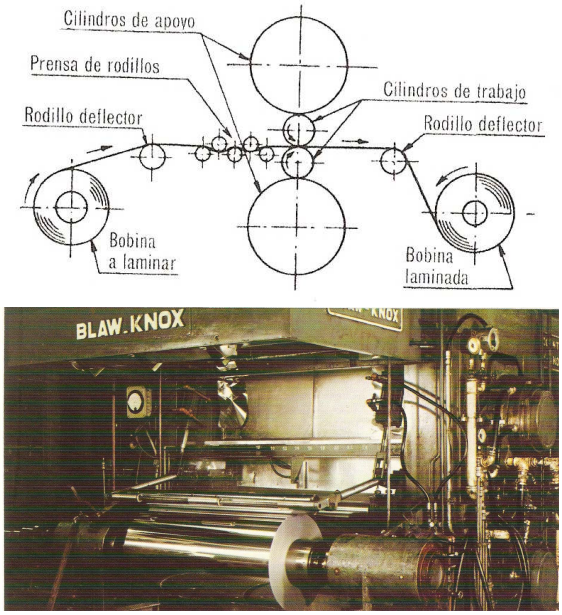


Figura 4.2: *Representación del proceso de laminación en laminador dúo (esquema y fotografía)*

Casi siempre es normal someter a la hoja fina, a un tratamiento de recocido para eliminar la acritud producida por la laminación y además eliminar el aceite lubricante que recubre la superficie del aluminio.

4.2. Extrusión.

Uno de los procesos más comunes aplicados sobre el aluminio o sus aleaciones es la extrusión. Durante el mismo, se hace pasar una masa de aluminio (tocho) a través de una matriz o hilera que tiene la forma del perfil que se quiere conseguir. Con esto se consigue conformar el material para obtener perfiles de diseños sencillos o complicados.

Debido a sus propiedades ya comentadas (plasticidad en caliente), el aluminio es uno de los metales más utilizados en este proceso ya que el material debe fluir de manera fácil a través de la abertura y para ello debe estar en estado plástico.

La temperatura a la que el aluminio alcanza el estado plástico necesario para realizar este proceso está alrededor de los 500 ºC. La materia prima se suministra en lingotes cilíndricos y tras someterlos a la temperatura adecuada, un émbolo empuja el lingote a través del molde a la presión necesaria en cada caso.

Muchas aleaciones de extrusión son tratables térmicamente en prensa y en este caso el proceso tiene dos fases. La primera es la extrusión con unas condiciones donde el perfil alcance una temperatura en la que los elementos endurecedores queden en solución sólida y se enfría el perfil a la salida de la prensa con suficiente velocidad. En la segunda fase, los perfiles después de extruidos son sometidos a un tratamiento de precipitación en hornos adecuados para lograr el endurecimiento de los perfiles. La temperatura para este tratamiento suele estar hacia los 160 ºC y la duración del tratamiento alrededor de las seis horas.

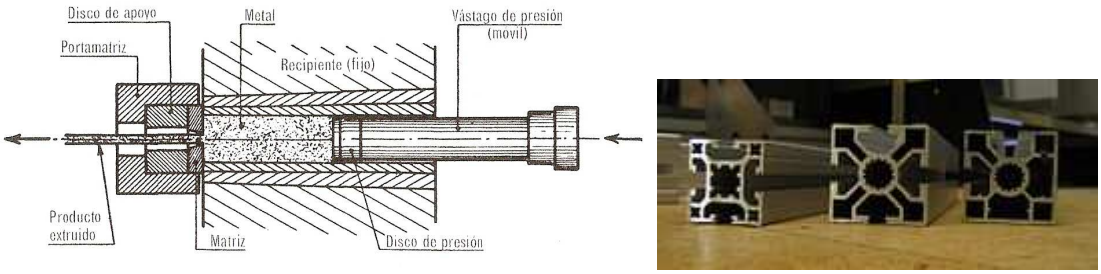


Figura 4.3: *Representación del proceso de extrusión y perfiles de aluminio extruido*

4.3. Estirado y trefilado.

El estirado y trefilado son operaciones de la misma naturaleza que tienen por objeto reducir la sección del producto obligando al material a alargarse plásticamente bajo la acción de una fuerza exterior de tracción. En la figura 4.4 se presenta una sección de una hilera de tracción o estirado.

Las hileras utilizadas en la trefilación del aluminio y sus aleaciones pueden ser de metal duro (carburo de tungsteno) o diamante.

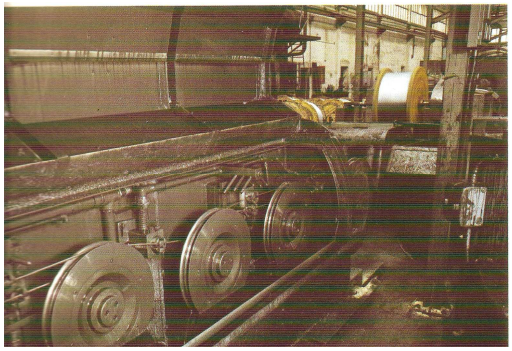


Figura 4.4: *Sección de una hilera de tracción o estirado*

La fabricación de alambres utiliza las máquinas trefiladoras que suelen tener un número elevado de hileras.

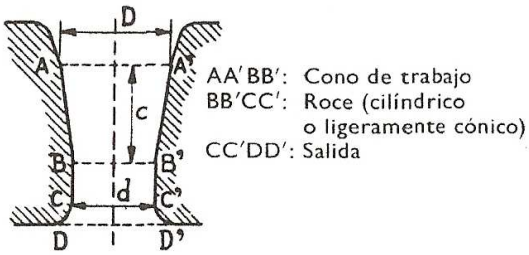


Figura 4.5: *Forma de una hilera*

Uno de los usos más importantes de los alambres de aluminio obtenidos mediante este proceso es la fabricación de conductores eléctricos para líneas aéreas. Actualmente los tipos de conductores más utilizados son los cables de aluminio reforzados con acero, (ACSR) siglas inglesas de Aluminum Conductor Steel Reinforced.

En Francia y en países que fueron sus colonias se utilizan cables hechos con alambres de una aleación de aluminio conocida como ALMELEC. Esto es una variedad, con buena conductividad eléctrica, de una aleación de la familia 6000. La resistencia mecánica de los cables fabricados con este tipo de aluminio puede ser equivalente a la del cable compuesto, aluminio con alma de acero.

4.4. Fundición y moldeo.

El cuarto proceso que se va a explicar va a ser la fundición o moldeo de piezas, proceso que fundamentalmente consiste en llenar un molde con la cantidad necesaria de material fundido, donde tras solidificar, se obtiene la pieza de la forma y el tamaño del molde.
Dentro de este proceso existen importantes diferencias en cuanto al tipo de molde utilizado. Así existe el moldeo en arena o el moldeo en coquilla. A su vez, dentro del moldeo en coquilla (molde metálico) está la fundición a presión y el moldeo al vacío.

Las piezas obtenidas por moldeo están orientadas a muchos y muy diversos sectores ya que se pueden fabricar piezas prácticamente de cualquier peso (desde gramos hasta toneladas). Por ejemplo, puede fabricarse una pieza para un motor de un vehículo o grandes bastidores de máquinas.

Figura 4.6: *Pistón de motor (izquierda) y cabeza de un aerogenerador (derecha)*

4.5. Mecanizado.

Otro proceso muy usual que se realiza sobre aluminio y sus aleaciones para la obtención de muchas piezas es el mecanizado. Tiene lugar en máquinas-herramienta y en general es una técnica muy rápida y sencilla, por lo que es ampliamente utilizada.
Dadas sus propiedades ya mencionadas en este trabajo, resulta mucho más fácil arrancar viruta de aluminio que de otros metales, por ejemplo el acero (de hecho, la fuerza necesaria para el mecanizado del aluminio es aproximadamente un 30 % de la necesaria para mecanizar acero). Lógicamente, las fuerzas de corte que tienen lugar sobre el aluminio son relativamente bajas, haciendo que los esfuerzos sobre las piezas y la energía necesaria a lo largo del proceso no sean excesivamente altos.
Evidentemente, la tecnología del mecanizado mejora continuamente y en la actualidad existen máquinas-herramienta de control numérico que permiten girar los cabezales que realizan los cortes a unas revoluciones por minuto del orden de 30.000 rpm. Esto hace también que los avances de trabajo sean mayores.
A esas revoluciones de trabajo tan elevadas se genera mucho calor en la pieza a mecanizar. Sin embargo, la buena conductividad térmica del aluminio hace que ese calor se disipe rápidamente y por lo tanto es un material muy apto para este proceso. En todo caso, a pesar de la rápida evacuación del calor generado, es imprescindible contar con una buena refrigeración en el sistema.
No todo son ventajas, ya que su baja resistencia hace que en ocasiones puede dar lugar al embotamiento de las herramientas de corte, lo que deriva en una peor calidad final de la pieza.
Este proceso puede permitir que en ocasiones no sea necesario realizar una fundición para conseguir una determinada pieza, ya que es posible realizar un mecanizado sobre un prisma al cual se le vacía las partes necesarias.

Dentro de las herramientas de corte propias utilizadas para el mecanizado de aluminio hay tres grandes familias:

- Herramientas de acero rápido. Son apropiadas para el mecanizado de aleaciones de aluminio con bajo contenido en silicio. Se utilizan preferentemente en el sector de la carpintería metálica para mecanizar perfiles extrusionados.
- Herramientas de metal duro. Su mayor ventaja es la mayor duración de la herramienta y se emplean generalmente en el mecanizado de aleaciones de aluminio con alto contenido en silicio así como para mecanizados con alta velocidad de corte.
- Herramientas de diamante. Se caracteriza por ser la herramienta con más durabilidad y al igual que en el caso anterior se suele emplear para mecanizar aleaciones de aluminio con un elevado contenido en silicio.

Mencionar también la importancia del lubricante en este proceso. Normalmente se utilizan productos emulsionables en agua con aditivos de lubricación que sean específicos para esa función.

4.6. Soldadura.

El último proceso aplicable al aluminio es la soldadura, dentro de la cual existen varias posibilidades y a continuación se detallan las dos más usadas.
Una es la soldadura por arco eléctrico bajo atmósfera inerte. Este procedimiento se caracteriza por el uso permanente de un electrodo no consumible, generalmente tungsteno y un material de aporte de aleación de aluminio-silicio. El tungsteno posee una temperatura de fusión muy elevada (alrededor de 3.410 °C) por lo que dota al electrodo de una gran durabilidad y apenas se desgasta en un uso prolongado.
Es muy importante proteger el arco para evitar la oxidación del aluminio fundido y para ello los gases más comúnmente utilizados son el argón, el helio o una mezcla de ambos. Cabe comentar también que la limpieza de las piezas a soldar debe ser especialmente cuidada en el momento de realizar el proceso.
Este tipo de soldadura se conoce con las siglas TIG (Tungsten Inert Gas) y la figura 4.7 ofrece una imagen de este tipo de soldadura.

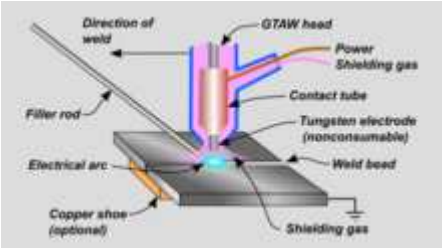


Figura 4.7: *Esquema de la soldadura sistema TIG*

Existe otro método de soldar aluminio todavía más utilizado que el descrito antes. Es el conocido como MIG, siglas que corresponden a las palabras inglesas (Metal Inert Gas). Con esta técnica no se emplea un electrodo auxiliar ya que la misma varilla hace la doble función de electrodo y metal de aporte. Este electrodo es un alambre de aleación de aluminio-silicio arrollado en un pequeño carrete motorizado, de modo que el alambre se va desenrollando a la misma velocidad que este se consume e insuflando, simultáneamente argón al cordón de soldadura que se va formando. La productividad con este tipo de soldadura es muy elevada.
La figura 4.8 muestra un esquema de este sistema.

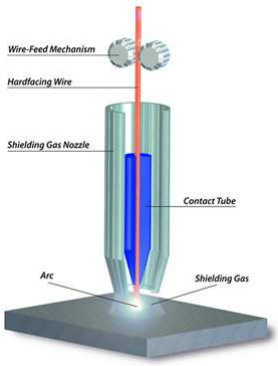


Figura 4.8: *Esquema de la soldadura sistema MIG*

5. Aplicaciones del aluminio.

El aluminio y sus aleaciones son utilizados en muchas y muy diversas aplicaciones y en los siguientes apartados se van a nombrar y describir brevemente algunas de estas aplicaciones.

5.1. Envase y embalaje.

Un uso muy popular y visto diariamente en uso doméstico es el papel de aluminio, en donde la capacidad de ser fácilmente maleable, además de su poco peso y de su compatibilidad con comidas y bebidas hace de este material el más indicado para dicha función. Además de estas ventajas, el aluminio es altamente utilizado en embalaje debido a sus buenas propiedades mecánicas a baja y alta temperatura, su buena conductividad térmica y eléctrica, buena resistencia a la corrosión, buena capacidad de deformación a temperatura ambiente, su sabor neutro y su capacidad de ser impreso con las técnicas habituales.
El aluminio empleado en el envasado de alimentos lo hace casi siempre en forma de "complejos flexibles" de los que un ejemplo muy conocido es la combinación de cartón, polietileno y hoja fina de aluminio para dar lugar al complejo de los envases "tetrabrik" de uso tan extendido.
Entre los envases rígidos se citan, como de muy amplio uso, los envases rígidos o latas para bebidas gaseosas. Este uso es muy adecuado ya que el aluminio protege el contenido, durante largos periodos, de la entrada de oxígeno y de la luz. Son envases muy ligeros, resistentes, permiten enfriar las bebidas rápidamente, son resistentes a los golpes y presentan una gran comodidad de manejo. Y muy importante, son 100 % reciclables.
Otros ejemplos similares en los que se utiliza el aluminio son en tapones de botellas, envases semi-rígidos para comidas preparadas o embalaje farmacéutico.

Figura 5.1: *Envases (izquierda) y latas de aluminio (derecha)*

5.2. Electricidad.

Ya se ha dicho que el aluminio es buen conductor de la electricidad y por ello es utilizado en aplicaciones eléctricas. Además el hecho de tener un bajo peso específico y un precio inferior al cobre, es una gran ventaja frente a este metal.
Un claro ejemplo es su aplicación en la fabricación de cables para tendidos eléctricos donde las ventajas de usar aluminio son muy claras ya que utilizar aluminio es una de las formas más económicas de transportar energía donde se aprovecha además su buena proporción resistencia-peso.

Figura 5.2: *Aplicación en un tendido eléctrico*

Tiene también amplio uso en embarrados eléctricos en subestaciones o armarios eléctricos.

La hoja fina de aluminio es también el elemento conductor de muchos condensadores eléctricos y también son utilizadas para fabricar por ejemplo bobinas magnéticas o devanados de transformador.

5.3. Aeronáutica y automoción.

Actualmente se fabrican numerosas piezas o componentes de vehículos y aviones en aluminio debido a que la ligereza del material supone una reducción del peso de hasta un 30 %, lo que se traduce en un ahorro de combustible ya que es necesaria menos fuerza y potencia para moverse, y por lo tanto genera un menor porcentaje de polución. El hecho de que el peso sea menor también ayuda a que sea posible llevar una carga mayor. Además la utilización de este material conlleva grandes ventajas medioambientales relacionadas con la reciclabilidad, ya que casi la totalidad del aluminio utilizado en vehículos o aviones puede ser recuperado y reciclado.
En el caso de los coches que es el que más de cerca se puede comprobar, además de todo lo dicho en el párrafo anterior, el uso de aluminio ayuda para reducir el peso no suspendido y ello contribuye a tener un funcionamiento más suave lo que hace que la

comodidad sea mayor. Un caso muy extendido en este campo de la automoción es el de las llantas de aluminio.
Por último, en el sector ferroviario también es altamente utilizado ya que se ha demostrado que un tren de aluminio ahorra una importante cantidad de energía a lo largo de su vida si lo comparamos con los mismos fabricados con otro material más pesado.

Figura 5.3: *Aplicación de aluminio en aeronáutica y automoción*

5.4. Utensilios de cocina.

El aluminio y sus aleaciones también son útiles en utensilios de cocina, de uso doméstico y herramientas aprovechando su buena conductividad térmica así como tu compatibilidad con los alimentos.

Figura 5.4: *Aplicación en diferentes utensilios de cocina*

5.5. Construcción.

Es muy conocido el empleo del aluminio también en el campo de la construcción, por ejemplo en la fabricación de puertas, tejados, ventanas y contraventanas. Las razones por las que se utilizan en estas aplicaciones son sus buenas características mecánicas, su capacidad decorativa como revestimiento en las fachadas de edificios y la alta resistencia a la corrosión. Hay que recordar que las ventanas con rotura de puente térmico llevan aparejado un ahorro en el coste de mantenimiento de calefacción y aire acondicionado.
En la figura 5.5 se muestran unas ventanas y un “muro cortina” en aluminio.

Figura 5.5: *Ventana fabricada con aluminio y fachada con revestimiento de aluminio*

Por otra parte también se utiliza el aluminio en la construcción de puentes debido principalmente a su resistencia a la corrosión.

Figura 5.6: *Puente construido de aluminio*

5.6. Industria naval.

Otra posible aplicación del aluminio es en mecanismos acuáticos (generalmente cascos de barco). El aluminio es ampliamente utilizado en el sector de la industria naval dado que posee una alta resistencia a la corrosión frente al agua del mar. La baja densidad de este metal mejora el diseño en cuanto a la flotabilidad y aumenta la capacidad de llevar más carga útil o mayor velocidad para una potencia de motor dada. Todo ello lleva también a un ahorro de combustible, aumentando también la comodidad y la seguridad de los pasajeros.

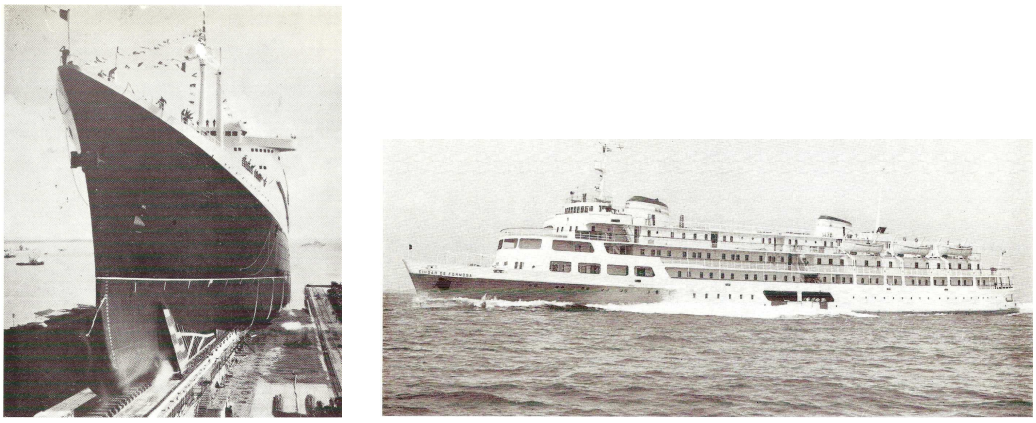


Figura 5.7: *Paquebote "France" (izquierda) y superestructura totalmente en aluminio del "Ciudad de Formosa" (derecha)*

6. Reciclado.

Un aspecto muy importante a destacar en el uso del aluminio es su capacidad para ser reciclado. Cualquier producto de aluminio puede ser reciclado numerosas veces sin perder sus propiedades, por lo tanto el material puede ser reutilizado tantas veces como sea necesario y con buenas cualidades para obtener el mismo producto u otros.

El ciclo del reciclado empieza justo después de su producción o transformación, ya que los recortes y restos de procesos industriales tales como por ejemplo la laminación o la extrusión se recuperan y reciclan directamente en la misma fábrica.
En el caso de los productos adquiridos por los consumidores, el ciclo del reciclado se inicia al final de su vida útil cuando, a través de diversos canales, llega a la planta de reciclado. Aquí, el primer paso es separar el aluminio de otros metales y elementos que puedan contaminarlo, mediante diversos métodos (manualmente, separadores magnéticos, separadores por corrientes de Foucault, etc.). Una vez eliminadas todas las partes no metálicas del aluminio, éste es prensado y embalado. Posteriormente se traslada a plantas específicas conocidas como fabricantes de aluminio de "segunda fusión". En estas fábricas el fundidor o refinador lo convierte en lingotes, tochos, productos de desoxidación, etc. que serán utilizados para crear nuevos productos.
Todo el proceso de reciclado necesita poca energía, de hecho el proceso de refundido requiere únicamente un 5 % de la energía necesaria para producir un producto equivalente del metal primario inicial.
Son indudables los beneficios ambientales y económicos que suponen la recuperación y reutilización del aluminio.

Figura 6.1: *Chatarra de aluminio comprimida*

Por todo lo comentado el aluminio es un material idóneo para el mundo actual. Es el elemento más abundante de la corteza terrestre después del oxígeno y el silicio, y además puede ser reciclado numerosas veces sin por ello perder un ápice de sus cualidades.

7. Tratamientos superficiales.

Tras haber abordado en el apartado 4 algunos de los procesos más importantes mediante los cuales se obtienen diferentes semielaborados o productos de aluminio, a partir de ahora el trabajo se va a orientar en los tratamientos de superficie posteriores a la obtención de la forma de la pieza, con el fin de mejorar algunas propiedades según el uso para el que esté destinada. En estos tratamientos mencionados se creará una capa encima de la superficie de la pieza o bien se introducirá en el interior de la misma, pero nunca se modificará la forma.
Muchos productos de aluminio pueden necesitar un tratamiento de superficie para mejorar su aspecto y/o darle una protección contra el efecto del medio ambiente. Los tratamientos pueden ser mecánicos, químicos o electroquímicos. No se describen los tratamientos de superficie mecánicos por no alargar la parte introductoria de este trabajo. Únicamente se van a detallar los dos tipos de tratamientos que son más utilizados, como son los tratamientos de conversión y el anodizado.

7.1. Recubrimientos químicos de óxido (conversión).

Cuando el aluminio se sumerge en agua caliente, se forma una capa de oxido protectora más o menos densa. La estructura y composición química de esta capa varía especialmente con la temperatura del agua. Hasta aproximadamente 75 a 80 ºC, la capa consiste principalmente en bayerita, $Al_2O_3 + 3H_2O$, con otros óxidos. Este es el principio de los procesos llamados de conversión y las capas obtenidas se conocen como capas de conversión (“conversion coatings”).

Estos recubrimientos de conversión química, eran conocidos hace muchos años, pero fue después de la Segunda Guerra Mundial cuando han logrado la gran importancia industrial que tienen en la actualidad. Están basados en el aumento del grosor de la capa de óxido presente en el aluminio, con la producción de fosfatos y/o cromatos en su superficie.

El primer método de este tipo que se va a nombrar es el cromatizado, desarrollado por O. Bauer y O. Vogel en 1915, quienes sugirieron la oxidación del aluminio con una solución conteniendo:

- Carbonato potásico (25 g por litro).
- Bicarbonato de sodio (25 g por litro).
- Dicromato potásico (10 g por litro).

Posteriormente, en 1923 se patentó una mejora sobre el proceso Bauer-Vogel. En este caso la solución contenía:

- Dicromato potásico (3,3 g por litro).

- Sosa calcinada.
- Alumbre.

En este proceso se añadía como catalizador el alumbre para acelerar el proceso. El baño precisaba de agitación, trabajaba a 95 ºC y la duración del tratamiento era de media hora. Después del tratamiento las piezas se enjuagaban y secaban.

Otro proceso de conversión es el fosfatado y se dice que ya fue empleado por los romanos. En tiempos más modernos fue descubierto y patentado por T.W. Coslett en 1906, que usó una solución que contenía ácido fosfórico y sulfato de hierro. Este sistema fue mejorado por la empresa Parker y llegó a conocerse industrialmente como "Parkerizado".

Actualmente existen recubrimientos que combinan el cromatizado y el fosfatado, como el conocido comercialmente como "Alodine".
El fosfatado y el cromatizado son dos tratamientos muy utilizados para la protección superficial del aluminio que pueden emplearse como tratamiento final o como base para pintura u otros recubrimientos. Todos ellos son recubrimientos de poco espesor, no resistentes a la abrasión y dotan a la pieza de una protección a la corrosión inferior a la del anodizado.

7.2. El anodizado. Generalidades.

El aluminio al estar en contacto con el oxígeno del aire, forma por sí solo una delgada película de óxido de aluminio en su superficie para protegerse de la acción de los agentes atmosféricos, lo que recibe el nombre de alúmina (Al_2O_3). Esta capa natural tiene varias características que se exponen a continuación:

- Según la temperatura de formación, su espesor oscila entre 0,01 y 0,04 micras.
- Es transparente.
- Es impermeable.
- Su resistencia a la corrosión es muy superior a la del aluminio subyacente.

Hace ya muchos años que se inventó el proceso de anodizado, que consiste en obtener una capa de óxido con un espesor muy superior al de la capa de óxido natural y cuyas características son mejores e incluso se generan otras nuevas de gran interés práctico. Las características más importantes de la película artificial de óxido de aluminio son:

- Su espesor es del orden de unas mil veces superior al de la película natural.
- Aumenta notablemente la dureza y la resistencia superficial a la abrasión.
- Antes de la operación de sellado que se le aplica, tiene un gran poder de absorción por lo que se le puede dotar de coloración.

- Una vez aplicado el proceso de sellado, la capa de óxido es perfectamente impermeable y adquiere una gran resistencia frente a la corrosión atmosférica.

Otra característica importante es que la capa de óxido de aluminio obtenida tras el anodizado posee un buen grado de aislamiento eléctrico pero para obtener los mejores resultados en este sentido se utilizan electrolitos diferentes al ácido sulfúrico, que va a ser el empleado en este trabajo.

7.2.1. Propiedades del anodizado.

Una pieza de aluminio anodizado es notablemente mejor en resistencia a la abrasión y a la corrosión que la que tiene únicamente la capa de óxido de aluminio creada de forma natural en la superficie.
La mejora de las características depende directamente del espesor de la capa producida, que a su vez depende del tiempo que dure el proceso. Para dar una idea numérica de este valor, la capa de alúmina creada de forma natural por el aluminio tiene un espesor del orden de 0,01 micras y la capa de óxido de aluminio formada artificialmente, en un anodizado en medio sulfúrico y de una hora de duración, puede tener 25 micras.

Una ventaja que se intuye fácilmente es que la capa producida por el anodizado no puede ser desprendida ni pelada ya que forma parte del material base y no es una capa aplicada sobre la superficie.

En relación a las propiedades más técnicas, la pieza dotada con anodizado tiene sobre todo mayor resistencia y durabilidad a los agentes externos que las no tratadas con dicho proceso. Estas son las características más destacables y las más buscadas aunque también ha mejorado su comportamiento en otros aspectos, como por ejemplo en la posibilidad de dotarle de un aspecto más decorativo facilitando el coloreado en el mismo proceso, en donde ya hay una amplia gama de colores según la aplicabilidad. Por tanto el acabado del anodizado permite mantener la apariencia del metal original (producido por tratamientos mecánicos, químicos o electroquímicos) y también se le puede dotar de una gran variedad de colores, tonos o texturas según las exigencias del producto final.

La capa de óxido de aluminio es eléctricamente un aislante. La cuantía de ese aislamiento depende del espesor de la capa de anodizado, de la porosidad y le afecta mucho la presencia de impurezas, pero siempre el nivel de asilamiento que se consigue es realmente alto.

El anodizado mejora de forma importante la resistencia a la abrasión o desgaste. Esto es consecuencia de que la capa está integrada en el propio metal. La alúmina creada es

un material extremadamente duro y permite tener una resistencia al desgaste superficial superior al de muchos tipos de acero.

A continuación se van a describir los principios en que se basa el proceso de anodizado y la forma práctica de llevarlo a cabo.

7.2.2. Ideas básicas sobre el proceso de anodizado.

En este párrafo se van a comentar algunos hechos sobre los inicios del anodizado. Se trata de un proceso relativamente moderno y surgió por la necesidad de proteger al duraluminio, el cual fue una de las primeras aleaciones de aluminio que fue utilizada en la industria de una manera continuada. En los primeros años de haber surgido este método, el duraluminio anodizado se utilizaba generalmente en la fabricación de aviones e hidroaviones. La razón por la que se investigó en un proceso que dotara de protección a piezas de duraluminio era debido a que se corroía bajo la influencia de la atmósfera marina. Fue Bengough-Stuart en 1923 quien realizó el primer procedimiento industrial de anodizado del aluminio (usando ácido crómico como electrolito), con el objetivo ya comentado de utilizarlo en la fabricación de hidroaviones.
Los primeros procesos de este tipo realizados con ácido sulfúrico como electrolito, que se ha convertido en el más común en la actualidad, datan de 1937. A pesar de ser el más utilizado, se continuó investigando sobre el proceso y continuaron apareciendo nuevos electrolitos que también pueden ser usados en el desarrollo del anodizado.

El anodizado se trata de un proceso químico electrolítico y una instalación de anodizado consta en esencia de una cuba electrolítica (donde se encuentra el baño electrolítico) dotada de unos embarrados (ánodo y cátodo) y un rectificador para la alimentación de corriente continua.
En el desarrollo del proceso, se aplica una corriente eléctrica continua entre el ánodo y el cátodo, lo que se deriva en una separación de los elementos del compuesto del electrolito para dar lugar a la formación de hidrógeno en el cátodo y la formación de oxígeno en el ánodo, que oxida al aluminio para formar su óxido de aluminio.
La energía necesaria para separar los iones la aporta la corriente eléctrica y lógicamente, cada electrodo atrae a los iones de carga opuesta, por tanto los iones negativos son atraídos y se desplazan hacia el ánodo y los positivos hacia el cátodo.
De una manera simplificada, las reacciones que tienen lugar se van a representar mediante las siguientes ecuaciones:

En el ánodo se verifica la reacción: $2\ Al + 3\ H_2O \rightarrow Al_2O_3 + 6\ H^+ + 6\ e^-$
Mientras que en el cátodo se verifica la siguiente reacción: $6\ H^+ \rightarrow 3\ H_2$

A continuación en la figura 7.1 se expone un esquema simple de un proceso general de electrolisis.

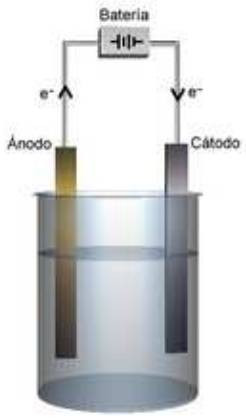


Figura 7.1: *Diagrama del proceso de electrolisis*

7.2.3. Aspectos teóricos de la anodización.

En la experimentación del anodizado se ha visto que si el proceso se realiza en un electrolito con un ligero poder de disolución (como el ácido sulfúrico), a los pocos segundos de aplicar la corriente, la intensidad de la misma desciende rápidamente hasta un valor determinado. Este valor se estabiliza y si se mantiene el voltaje, desciende ligeramente a lo largo de la duración del proceso.

Como ya se ha explicado, el fenómeno que tiene lugar es que debido al paso de la corriente se produce oxígeno en el ánodo, que al oxidar al aluminio le recubre de una capa de óxido de aluminio que es eléctricamente aislante.
Esta capa es compacta, continua y aislante, pero el proceso se detendría si no fuera por el poder disolvente del electrolito que crean unos poros por los que circulan los iones que hacen conductor al baño electrolítico (figura 7.2). Por esta razón, la capa de óxido de aluminio puede alcanzar un máximo nivel de espesor. Este hecho se produce normalmente en anodizados que duran un tiempo prolongado y para la consecución de un buen tratamiento se debe lograr el equilibrio entre el ritmo de formación de óxido de aluminio y el ritmo en el que se disuelve dicha capa. Este equilibrio depende de la composición del electrolito, su temperatura y la densidad de corriente.

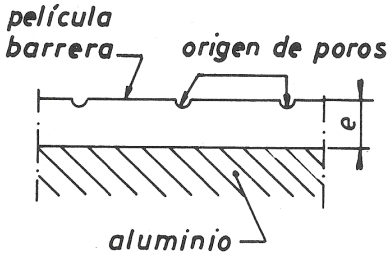


Figura 7.2: *Representación de la aparición de poros en la capa de óxido de aluminio*

Cada punto de ataque que se cree corresponde al origen de formación de un poro. Evidentemente, los primeros se originan en las partes más débiles de la capa, donde las razones para que nazcan aquí pueden ser discontinuidades superficiales o la influencia de los posibles componentes de la aleación.
A través de los poros el paso de corriente es más favorable y como consecuencia, alrededor de ellos se crea un campo de potencial esférico.

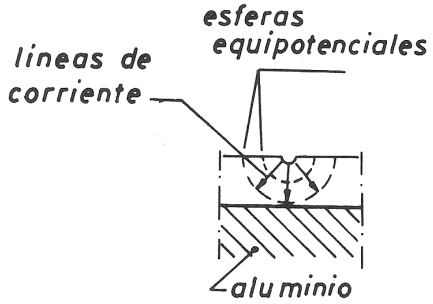


Figura 7.3: *Representación del campo esférico formado alrededor de un poro*

Tal y como se observa en la figura 7.3, las líneas de corriente son perpendiculares a las esferas equipotenciales, las cuales se distribuyen radialmente. Por ello, el avance de crecimiento del poro tiene forma semiesférica.
El interior del poro está en contacto con el electrolito, que ya se ha dicho que tiene poder de disolución. Y este poder de disolución aumenta como consecuencia de que se eleva la temperatura (por efecto Joule) al pasar la corriente por la resistencia que ofrece el poro. Por todo esto, el proceso de creación del poro se hace más evidente.

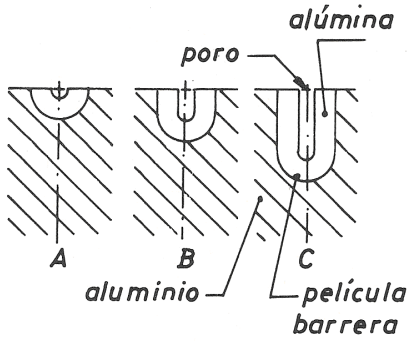


Figura 7.4: *Representación del crecimiento del poro*

Finalmente, como se puede apreciar en la figura 7.4 la forma que tiene la celda de alúmina es cilíndrica pero con un extremo esférico, estando evidentemente el poro en el eje.
Como el mismo proceso abarca a toda la superficie de la pieza, todos los puntos de la misma han desarrollado simultáneamente estos poros. La estructura final de la capa de óxido de aluminio es la que se representa en la figura 7.5.

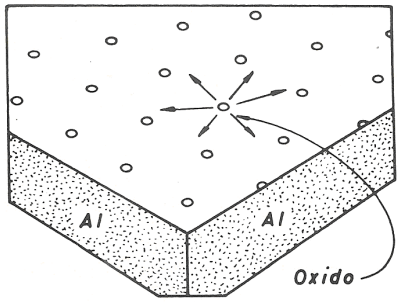


Figura 7.5: *Representación de la superficie de aluminio tras el anodizado*

Teniendo en cuenta la forma cilíndrica de las celdas de óxido, estas celdas forman una red de manera que la superficie es la representada en la figura 7.6, donde se ve que las celdas están juntas unas de otras.

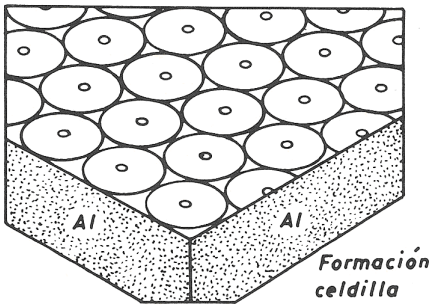


Figura 7.6: *Representación de la red que forman las celdas de óxido*

Observando la figura 7.6, está claro que existen zonas sin oxidar inicialmente entre tres poros tangentes entre sí. Esta zona comprendida entre tres celdas cilíndricas será oxidada debido a la influencia de los tres poros más cercanos. Por esta razón, se produce la transformación de celdas cilíndricas a celdas hexagonales como se ilustra en la figura 7.7.

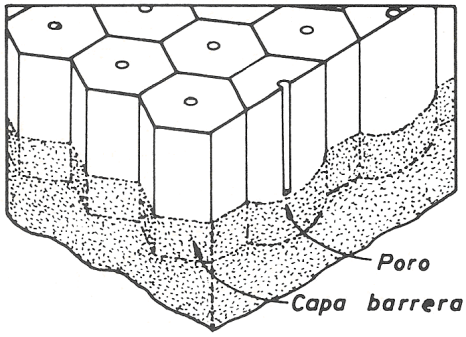


Figura 7.7: *Representación de las celdas hexagonales después de la transformación*

Cabe mencionar que la oxidación del material se produce desde la superficie hacia el interior, por lo que la capa producida forma parte integrante del aluminio y no se trata de una capa aplicada.

Las dimensiones de los poros y celdas de óxido así como el espesor de la capa de óxido dependen de varios factores, los cuales se nombran a continuación:

- La naturaleza del electrolito.
- El voltaje aplicado en el proceso de anodizado.
- La temperatura del anodizado.
- La composición y estructura de la aleación de aluminio.
- La densidad de corriente.
- El tiempo del proceso.

Muchos de estos factores están relacionados entre sí. Los baños de anodizado necesitan como fuente de alimentación equipos que generen corriente continua con salida entre 12 y 24 V. La tensión que se considere necesaria aplicar para una densidad de corriente seleccionada depende de varios factores, por ejemplo la concentración del electrolito, la aleación base a anodizar, el sistema de refrigeración o la temperatura. A tener en cuenta también que una menor temperatura conlleva un mayor tiempo de proceso.
La composición y estructura de la aleación puede dar lugar a la obtención de una capa anódica con color o tonalidad diferente del aspecto "plata" del anodizado habitual.

Varios autores han propuesto ábacos o fórmulas para la expresar la velocidad de la capa de formación anódica según el electrolito empleado.
Una publicación consultada relaciona el tiempo de duración del anodizado con el espesor y la densidad de corriente mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Tiempo (min.)} = 3{,}2\ \frac{\text{Espesor } (\mu m)}{\text{Densidad de corriente } (A/dm2)}$$

7.2.4. La práctica del anodizado.

7.2.4.1. Preparación de la superficie.

Antes de comenzar a realizar el proceso de anodizado propiamente dicho es fundamental la limpieza de las piezas con el objetivo de una correcta realización del anodizado. La secuencia del proceso de limpieza se muestra en el esquema de la figura 7.8.
Para ello, el primer paso es sumergir las piezas a tratar en un desengrasante con lo que se asegura la obtención de una capa anódica lo más homogénea posible. Tras haber

permanecido un tiempo suficiente, se retiran de la solución y se lavan con abundante agua.
El siguiente paso es realizar un ataque cáustico con sosa cáustica (proceso conocido como satinado) para conseguir una superficie lo más homogénea posible al mismo tiempo que desoxidar la superficie metálica de la pieza y eliminar pequeñas rayas si las hubiera. De nuevo se enjuaga la pieza al igual que tras el primer paso.
Tras estos pasos se debe introducir la pieza en una nueva solución (esta vez de ácido nítrico), manteniéndolas únicamente unos pocos segundos. Este proceso recibe el nombre de blanqueado o neutralizado ya que se elimina el tono oscuro que ha adquirido la superficie de las piezas en algunas aleaciones. Tras retirarlas, se debe volver a lavar con agua.
Después de realizar los pasos de preparación de la superficie comentados la pieza está lista para el proceso de anodizado propiamente dicho.
Por último, se lleva a cabo otro proceso que recibe el nombre de sellado (se explicará más adelante en el apartado 7.2.8).

Para realizar este proceso de una manera más eficiente, se lleva a cabo en una secuencia de cubas colocadas como se muestra en la figura 7.8. En cada cuba se realiza uno de los procesos comentados y a continuación pasa directamente a la siguiente cuba para el paso posterior.

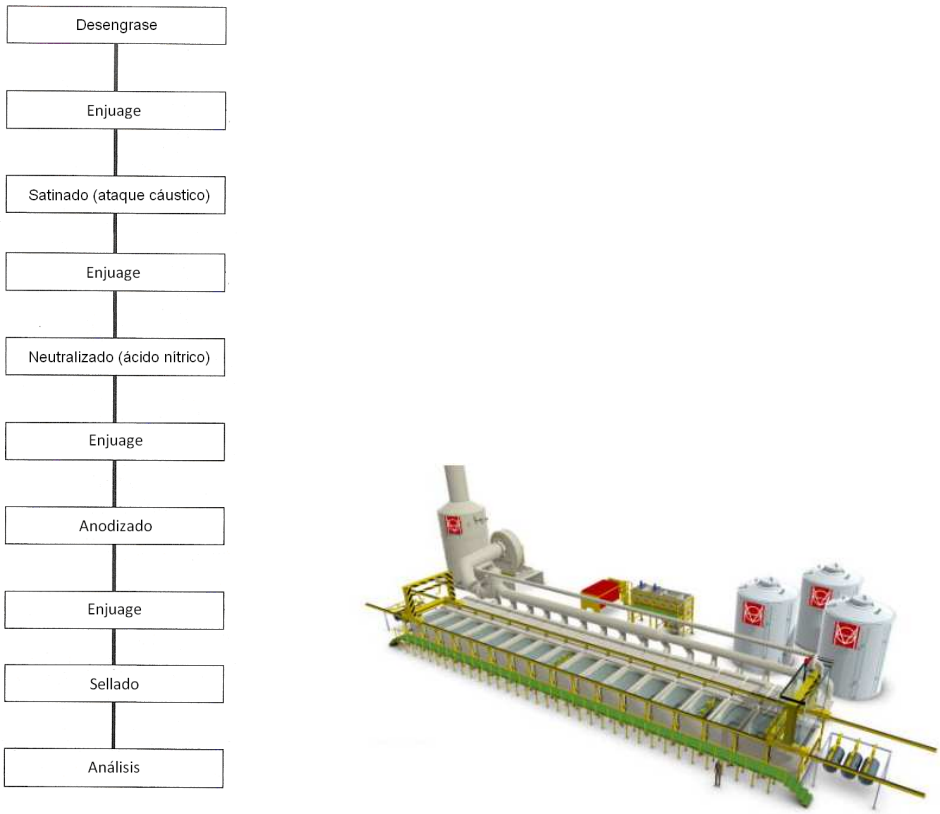


Figura 7.8: *Esquema del proceso de limpieza (izquierda) y distribución de las cubas continuas (derecha)*

7.2.4.2. Características y condiciones de la cuba de anodizado.

La cuba de anodizado suele requerir unas dimensiones superiores a las de las cubas que contienen las soluciones para los tratamientos antes descritos de desengrase, satinado y blanqueado. Además es normal la utilización de doble cátodo para lograr igualdad de capa anódica en las diferentes caras.
Mediante dos electrodos que están conectados a una fuente de alimentación, se aplica una corriente eléctrica continua. El electrodo conectado al polo positivo es el ánodo (en él se produce una reacción de oxidación) mientras que el electrodo conectado al polo negativo es el cátodo (en él se genera una reacción de reducción). El electrolito es una solución de ácido en agua, solución que es capaz de conducir la corriente eléctrica.
El baño electrolítico, donde se sumergen el ánodo y el cátodo, es una disolución de un determinado ácido. Dentro de los posibles ácidos que se utilizan en la anodización industrial, en el caso práctico que se va a llevar a cabo en este proyecto el electrolito que se va a utilizar va a ser ácido sulfúrico, el cual se encuentra disponible comercialmente y es muy utilizado en la anodización habitual de perfiles para ventanas.
Es posible adquirir de manera comercial ácido sulfúrico concentrado o por encargo en una determinada concentración. El ácido sulfúrico concentrado se disuelve en agua en cualquier proporción, liberándose una gran cantidad de energía en forma de calor. Este proceso es crítico y por ello se debe verter lentamente siempre el ácido concentrado al agua y agitar. Si se hiciera a la inversa (verter el agua sobre el ácido), el calor desprendido sería suficiente para vaporizar el agua y se podrían producir también salpicaduras de ácido concentrado hacia todas las direcciones. Por tanto su manejo debe ser cuidadoso para que no se produzcan vertidos ni proyecciones porque pueden producir quemaduras en la piel.

En la figura 7.9 se muestra una imagen más detallada de la cuba donde se realiza el proceso.

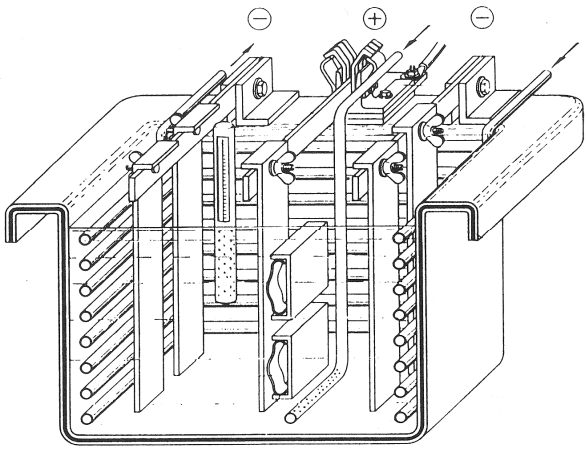


Figura 7.9: *Representación esquemática de un corte de una cuba de anodizado*

En esta figura 7.9 se muestra una sección de una cuba para el anodizado de perfiles de aluminio en la que se puede ver el material a tratar (perfiles en forma de U).
Se aprecia claramente la estructura necesaria, cómo las piezas de trabajo están unidas a dicha estructura así como también queda representado el sistema de refrigeración indispensable para mantener controlada la temperatura en todo momento. En cuanto a las piezas de trabajo, se puede distinguir la existencia de un ánodo y dos cátodos, uno a cada lado de la pieza central. La razón de este doble cátodo es conseguir la igualdad de capa obtenida en las diferentes caras de la pieza.

En la imagen de la figura 7.9 aparecen unas pinzas soportadas con un bastidor que se utiliza en la anodización de perfiles. Para piezas pequeñas se utilizarían pinzas tales como las representadas en la figura 7.10.

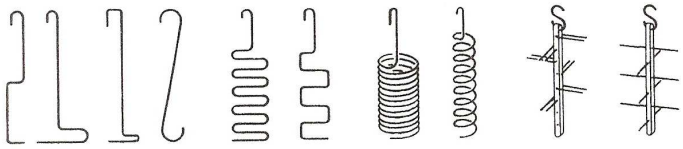


Figura 7.10: *Diferentes tipos de ganchos o pinzas para anodizar*

7.2.5. Tipos de electrolitos.

Dos son los principales tipos de electrolito que se utilizan en el proceso de anodizado: el que contiene ácido crómico y el que emplea ácido sulfúrico. A continuación se resumen las características de las capas anódicas producidas con ellos.

El proceso con ácido crómico da capas delgadas pero resistentes a la corrosión y se han utilizado en Gran Bretaña y EEUU por ejemplo para usos militares en aviones o equipos navales. Especialmente utilizado en estructuras remachadas, con pliegues y cavidades que deben llevar recubrimiento. Los restos de ácido en estas zonas reaccionan con el aluminio haciendo que se pasive el metal protegiendo esas zonas de ensamble contra la corrosión. Las capas anódicas en este caso no son normalmente tan resistentes al roce como las producidas con ácido sulfúrico.
También es posible producir ligeras deformaciones en la superficie de la pieza sin sufrir fisuras o grietas, al ser unas capas más delgadas y blandas.
Por último, las capas crómicas sin sellar son una base excelente para el anclaje de pintura.
Por todo ello, las películas crómicas se suelen utilizar sobre todo en la industria aeronáutica además de en decoración y arquitectura.

Los recubrimientos producidos con el electrolito sulfúrico son más gruesos y si son adecuadamente sellados, dan mejor resistencia a la corrosión así como mayor dureza y mejor resistencia a la abrasión. El proceso no puede ser utilizado en piezas remachadas

puesto que posibles restos del electrolito que puedan quedar son corrosivos y afectar al ensamblaje.
Las piezas que utilizan el ácido sulfúrico como electrolito en el proceso, se utilizan sobre todo en la decoración y arquitectura.
En general el proceso con electrolito sulfúrico es más barato que con electrolito crómico aunque la necesidad del sellado hace que los costes se acerquen.
En los últimos años ha habido un abaratamiento de los costos generales del anodizado porque los baños de ácido sulfúrico no se consideran gastados cuando la cantidad de ión aluminio supera una determinada concentración.

En la figura 7.11 se muestra una tabla de comparación de las diferentes condiciones de obtención y características de las capas anódicas obtenidas con estos dos electrolitos más utilizados, el ácido crómico y el ácido sulfúrico.

NATURALEZA DEL ELECTROLITO	*Procedimiento*	*Composición del Electrólito (% en peso)*	*Naturaleza de la corriente*	*Tensión V*	*Densidad de corriente A/dm²*	*Temperatura del baño ºC*	*Duración del Tratamiento m m.*	*Espesor de la película micras*	*Color de la Película*
ACIDO CROMICO	Bengough	CrO_3 2,5 a 3%	Continua	0 a 40 40 a 50 50	0,3 a 0,6	40º ± 3º	10 35 5	2 a 8	Gris mate
	Técnica utilizada en los EE. UU.	CrO_3 5 a 10%	Continua	40	0,4	35º ± 2º	30	2 a 5	Gris mate
	ELO 1 Procedimiento Español	CrO_3 10 al 20%	Continua	20 a 30	< 0,4	< 25º	90	4 a 6	
ACIDO SULFURICO	Alümilite	SO_4H_2 10 al 20%	Continua	10 a 20	1, 3 a 2	20º a 30º ± 2º	15 a 45	8 a 25	Transparente
	Eloxal GS	SO_4H_2 10 al 15%	Continua	15	1,2 a 1,8	10º a 25º ± 2º	20 a 40	8 a 25	Transparente
	Capas duras y gruesas	SO_4H_2	Continua	20 a 80	2,2 a 5	1º a 3º ± 1º	2 a 4 horas	200	Grisáceo

Figura 7.11: *Características de los principales procesos industriales de anodizado*

Tal y como se puede apreciar en la figura 7.11, las capas de óxido de aluminio obtenidas con ácido crómico tienen menor espesor que las obtenidas con ácido sulfúrico, por lo tanto se deduce que posee menor dureza y mayor flexibilidad. Esto no significa que las capas obtenidas usando ácido sulfúrico sean mejores que con ácido crómico, simplemente poseen características diferentes.
Por ejemplo, si el espesor de la capa de óxido de aluminio en ambos casos es igual, las películas crómicas protegen mucho más que las sulfúricas. Dando un valor numérico, se calculó que la protección era similar utilizando una capa crómica de 4,5 micras o una sulfúrica de 15 micras.

En la figura 7.11 no se indica ninguna recomendación para el contenido del ión aluminio para ningún electrolito, cuando éste es un factor importante.
En la anodización con el electrolito sulfúrico se dispone actualmente de equipos con resinas cambiadoras de iones capaces de secuestrar el ión aluminio, que pueden

mantener la concentración de aluminio en un valor recomendado constante alrededor de 10 g/l .

Como se refleja en el gráfico de la figura 7.12, es posible trabajar con una densidad de corriente de hasta 2 A/dm^2 con la concentración de ión aluminio citada.

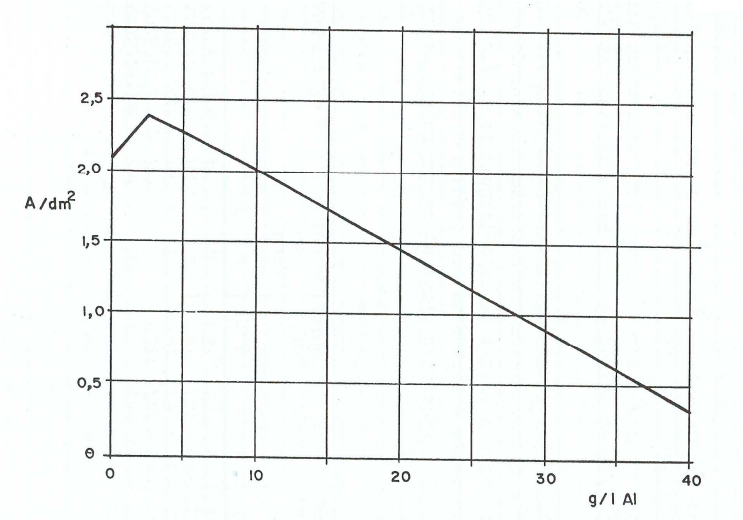


Figura 7.12: *Gráfico que demuestra la influencia de la densidad de corriente en función del contenido de aluminio*

7.2.6. Otros electrolitos.

Una vez comentados los dos electrolitos más importantes y más utilizados actualmente en la industria del anodizado, se va a hacer una breve mención de otros tipos de electrolito que también pueden ser utilizados pero en menor cantidad. En la figura 7.13 se muestran algunas de sus características.

NATURALEZA DEL ELECTROLITO	*Procedimiento*	*Composición del Electrólito (% en peso)*	*Naturaleza de la corriente*	*Tensión V*	*Densidad de corriente A/dm²*	*Temperatura del baño °C*	*Duración del Tratamiento m m.*	*Espesor de la película micras*	*Color de la Película*
ACIDO FOSFORICO		PO_4H_3 25 a 50%	Continua	20 a 25	1,3 a 2	30°	5 a 10	2 a 5	Transparente u Opalescente
ACIDO SULFAMICO		5% de ácido Sulfámico	Continua	5 a 45 45	1,5 a 5	35° a 45° ± 3°	15, 25 o 40	20	Transparente
ACIDO OXALICO	Eloxal GX	$(COOH)_2$ 3 a 5%	Continua	40 a 60	1 a 2	15° a 20°	40 a 60	20 a 30	Amarillo
	Eloxal WX	$(COOH)_2$ 3 a 5%	Alterna	40 a 60	2 a 3,5 eficaces	25° a 35	40 a 60	20 a 40	Amarillento
	Capas duras	$(COOH)_2$ 3 a 5%	Continua	40 a 60	1 a 2,3	3° a 5° ± 1°	Varias Horas	500 a 600	Amarillo
ACIDO BORICO		BO_3H_3 10 a 15% Borax 0,1 a 0,25%	Continua	250 a 500		90° a 95°	Variable	0,1 a 0,3	Irisado

Figura 7.13: *Características de otros procesos industriales de anodizado*

Cabe comentar algunos de los datos que aparecen en la tabla de la figura 7.13. Por ejemplo, al utilizar ácido fosfórico se obtienen películas delgadas y muy porosas.
También existen muchos procesos que utilizan el ácido oxálico como base para la formulación del electrolito. Los procesos con ácido oxálico requieren la aplicación de voltajes superiores a los utilizados en el proceso con ácido sulfúrico.
Por otra parte, utilizando ácido oxálico a temperatura de baño entre 30 y 60 ºC, las durezas obtenidas son similares a las que se tienen con el ácido sulfúrico y por tanto sus aplicaciones también pueden ser prácticamente las mismas.
Para obtener capas duras se recurre a baños con ácido oxálico y una temperatura baja del electrolito (3-5 ºC).
Por último destacar también que hay procesos que utilizan corriente alterna.

7.2.7. Coloreado de la capa anódica.

Una vez creada la capa anódica, cabe la posibilidad de colorearla y una de las opciones es por impregnación con colorantes orgánicos disueltos en agua y otra opción es recurrir a sales metálicas utilizando equipos eléctricos. Tanto los colorantes orgánicos como las sales metálicas disueltas se introducen en el fondo del poro debido a que la capa anódica es muy absorbente.
En la figura 7.14 se muestra una representación válida para los dos tipos de coloreado.

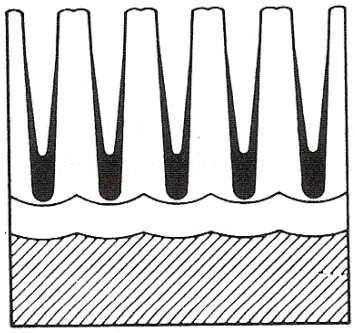


Figura 7.14: *Representación esquemática del coloreado por absorción de colorante orgánico o sales metálicas*

La capacidad de que la capa de óxido pueda ser coloreada depende de las condiciones en las que se haya realizado el anodizado, del espesor de la capa, del número de poros existentes en cada caso así como de las condiciones en las que se vaya a aplicar el tono de color.

Evidentemente, según el metal y la cantidad depositada es posible obtener distintos colores y distintas tonalidades dado que estos factores influyen sobre la difracción de la luz a través de la capa de aluminio anodizado.
Una representación del fenómeno de absorción se da en la figura 7.15.

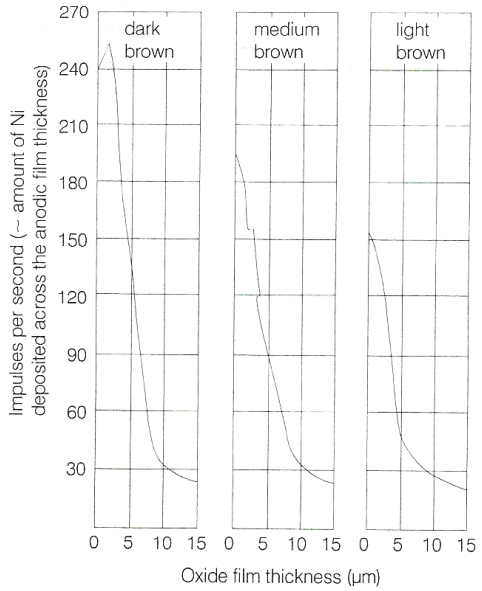


Figura 7.15: *Variación del tono de color en la capa en función del espesor y el número de partículas depositadas*

En dicha figura 7.15 se puede observar claramente que para un espesor determinado, en función de la cantidad depositada, el color o el tono varía.

7.2.7.1. Coloreado por absorción.

El coloreado por absorción consiste en sumergir las piezas anodizadas y antes de ser selladas (proceso explicado en el apartado 7.2.8) en un baño con colorante, habitualmente orgánico, disuelto en agua.
Existe una amplia gama de colores, desde el oro claro hasta el negro, pasando por varias tonalidades de bronces. A pesar de adquirir un nuevo color, el carácter metálico de las piezas no se oculta y se conserva gracias a la transparencia de la capa.
Generalmente el aluminio anodizado y coloreado por absorción es utilizado para aplicaciones en interiores, muebles metálicos, electrodomésticos, bisutería, etc. ya que la resistencia a la luz e intemperie no alcanza lo que se exige en aplicaciones de arquitectura como por ejemplo las ventanas de edificios.

7.2.7.2. Electrocoloración.

El método de obtención de capas anódicas coloreadas más utilizado es la electrocoloración. Se trata de un proceso electrolítico en el que se aplica corriente alterna y se utiliza un electrolito que contiene sales metálicas inorgánicas donde se sumerge la pieza. En este caso se aprovecha la porosidad de la superficie anódica y la atracción eléctrica existente para introducir en ella la coloración deseada a partir de las sales metálicas utilizadas.

Se obtienen coloraciones que son estables a lo largo de más de 20 años debido al hecho de que las partículas metálicas, que son muy resistentes a la luz, se depositan directamente en el fondo de los poros y son protegidas por la capa de óxido de aluminio originada.
Con este sistema se consigue mantener vivo el atractivo propio del brillo metálico y dureza del aluminio, condición que lo distingue del pintado (explicado en el apartado 7.2.9), además de su mayor resistencia al desgaste.
Con un mismo electrolito es posible obtener una amplia gama de colores con la adecuada variación de tiempo de tratamiento o de voltaje, como lo muestra la figura 7.16.

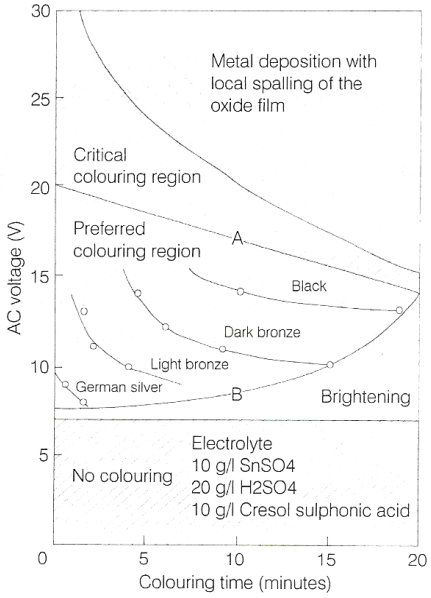


Figura 7.16: *Gráfica en la que se muestra la influencia del tiempo y el voltaje en la obtención de diferentes colores o tonos en la electrocoloración de la capa anódica*

En esta figura 7.16 la zona adecuada para realizar la electrocoloración es la comprendida entre la línea A y la B. Prestando atención a esa región, se aprecia como las condiciones del proceso de electrocoloración afectan al color que se obtiene en la capa anódica. Si se varía el voltaje aplicado y la duración del tratamiento, el resultado es que el color obtenido es diferente, pudiendo variar desde color plata hasta negro.

Un ejemplo del electrocoloreado que se tiene muy cerca es el de las ventanas y puertas exteriores de todos los edificios de esta Universidad Pública de Navarra. La carpintería metálica a la que se refiere está fabricada con perfiles de aluminio anodizados y con electrocoloración con sales de estaño.

7.2.8. Sellado.

Tras realizar el anodizado, se haya efectuado o no la coloración, existe un proceso complementario y necesario para dar por finalizado el tratamiento. El nombre más

común por el que se conoce a este proceso es sellado aunque también se le conoce como fijado. Dicho proceso condiciona la resistencia a la corrosión, a la abrasión y a la degradación del color que posea finalmente la capa de óxido de aluminio.

El método más empleado por los anodizadores hasta hace pocos años es el llamado sellado en caliente. La realización de este método consiste en someter a la capa anódica a la acción de agua hirviendo o vapor de agua a 100 ºC (generalmente agua desmineralizada) durante un determinado tiempo, con lo que la capa de óxido bien sellada pierde por completo su capacidad de absorción. La razón de este comportamiento es que la capa anódica se hidrata (formándose bohemita Al_2O_3-H_2O) en una dirección preferente, desde el exterior de los poros hacia el interior tal y como se aprecia en la figura 7.17.
La reacción que se produce siempre que el sellado se realice a una temperatura mayor de 80 ºC, como ocurre en este caso, es la siguiente:

$$Al_2O_3 + H_2O \rightarrow 2\ AlO(OH) \rightarrow Al_2O_3 + H_2O$$

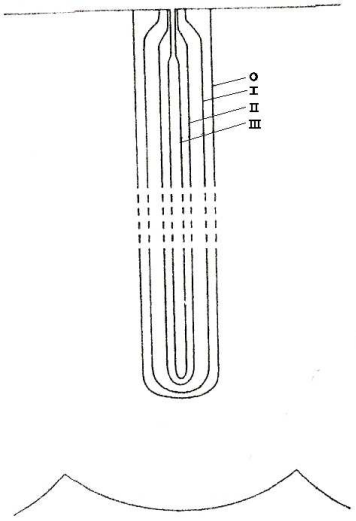


Figura 7.17: *Representación esquemática del proceso de sellado en su dirección preferente. O es la pared de un poro sin sellar mientras que I, II y III son pasos sucesivos del sellado*

Como consecuencia aumenta el volumen específico de las moléculas de alúmina, lo que produce finalmente el cierre total y hermético de los poros. Se ha demostrado que este proceso dota a la capa de alúmina de una mayor resistencia química en comparación con el estado no hidratado previo.

Cabe destacar que es un proceso muy delicado y por ello se deben tener en cuenta las siguientes condiciones en la realización del mismo:

- Si la duración del proceso no es la adecuada, no se producirá el cierre total de todos los poros. La evolución de la proporción del sellado es una curva del tipo de la figura 7.18, en la que aparece en función del tiempo.

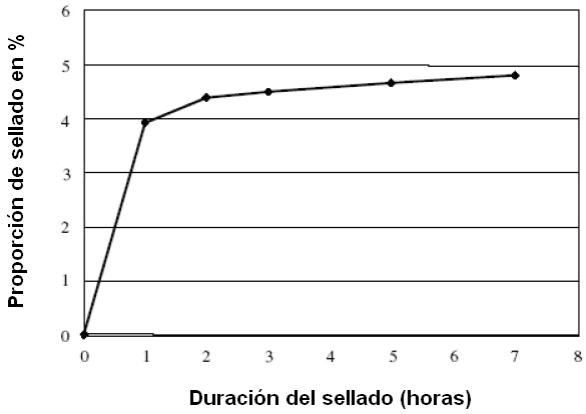


Figura 7.18: *Gráfica que muestra la evolución de la proporción de sellado en función del tiempo*

En la figura 7.18 se ve que tiempos de sellado muy largos no aporta una mejora importante respecto a los tiempos normalmente utilizados (aproximadamente una hora).

- Se debe tener mucho cuidado con el agua utilizada para realizar la hidratación. Si se utiliza agua no destilada, no desmineralizada o si el agua contiene algún tipo de impureza, se introducen en la capa anódica iones no deseados. En relación a este tema del agua utilizada, se ha demostrado incluso que la mejor calidad de sellado se obtiene con un pH entre 5,5 y 6,5.

A pesar de ser el método más utilizado hace años, presentaba una serie de inconvenientes como por ejemplo:

- El alto coste energético.
- Largos tiempos de sellado.
- Problemas generados en el bienestar de los trabajadores debido a las altas temperaturas empleadas.
- Problemas de corrosión en techos y estructuras originados por el vapor desprendido.
- Goteo continuo sobre el personal y el equipo como consecuencia del vapor generado.

Como consecuencia de ello, en los últimos años se ha desarrollado un procedimiento alternativo de sellado a baja temperatura o también llamado sellado en frío.
Evidentemente este proceso no se realiza a alta temperatura como el método más antiguo de sellado sino que se realiza a temperatura ambiente, manteniéndola entre 25 y 30 ºC con los correspondientes termómetros. Este parámetro es fundamental y si

la temperatura es demasiado elevada (especialmente con una alta concentración del baño) causa daños a la capa anódica produciendo una capa polvorienta.
Si el proceso de sellado se realiza a una temperatura inferior a 80 ºC, como ocurre en este caso, la reacción que se produce es la siguiente:

$$2\ AlO(OH) + 2\ H_2O \rightarrow Al_2O_3 + 3\ H_2O$$

En este caso no se produce bohemita como en el sellado en caliente sino que se produce bayerita ($Al_2O_3 + 3\ H_2O$).
Con este nuevo método se sustituye el agua en ebullición por disoluciones en las cuales hay iones que se introducen en la alúmina hidratada reduciendo así tanto el tiempo como la temperatura del sellado. Es decir, se lleva a cabo con sustancias químicas que se introducen en el interior de los poros e inician una reacción química, pudiendo ser estas sustancias por ejemplo sales de níquel o sales fluoradas. Para la realización del baño de sales es aconsejable utilizar agua desmineralizada dado que la calidad de este baño es crucial para obtener un buen sellado.
No es un proceso sencillo de realizar por el hecho de que los parámetros que intervienen están interrelacionados y hay que llevar un control muy preciso de ellos.
Por ejemplo, están relacionados entre sí la concentración de iones, la temperatura, el tiempo que dure el proceso o el pH de la solución, por lo que si varía alguno de ellos de forma notable afecta a los demás. Mantener controlada la concentración de iones libres es también muy importante ya que una cantidad excesiva podría dañar la capa anódica. En general cuanto mayor es el valor de pH de la solución, mejor es el resultado final pero conforme se han ido realizando prácticas con este método reciente se ha comprobado que dicho valor debe mantenerse entre 5,5-6,5.

Evidentemente, tanto en el sellado en caliente como en el sellado en frío, si el proceso no se realiza convenientemente no solo no se obtiene la capacidad de proteger al aluminio sino que se favorece su corrosión. El caso más común de un proceso mal realizado es cuando los poros obtenidos en el anodizado no son cilíndricos sino de conicidad muy abierta.

Hay que señalar que es inevitable una cierta formación de polvo en este proceso de sellado ya que es una consecuencia natural del mismo, pero el objetivo es obtener una capa de polvo tan ligera como sea posible para que no afecte a las características que se obtienen como por ejemplo la resistencia a la corrosión o el aspecto visual de las piezas. De no ser así sería necesario un proceso posterior para su eliminación.
Si esto último fuese la única solución, una opción posible para eliminar el polvo es la inmersión de la pieza en un baño ácido, el cual puede ser el baño del anodizado o el del blanqueado. Este método tiene el inconveniente de que el ácido ataca tanto a la capa de polvo exterior como a la capa intermedia, que posee una gran importancia en el comportamiento de toda la capa sellada.

Otro método es el medio mecánico (pulido). Esta solución es más arriesgada en el sentido de que existe un riesgo de reducir el espesor de la capa anódica.
Debido a los problemas que se comentan en relación a la eliminación del polvo, recientemente se han buscado condicionantes o aditivos que consigan la eliminación total del mismo. Esta es la solución que se aplica en la actualidad pero también se debe tener precaución ya que si no se aplican correctamente pueden llegar a afectar a la calidad final del sellado. Es decir, el aditivo antipolvo utilizado no debe afectar a la calidad del sellado, no debe retardar o alargar el proceso y no debe cambiar el color de la superficie.
Por todo lo dicho, el sellado es el último paso de todo el proceso de anodizado y por lo tanto debe ser llevado a cabo con la mejor técnica y el mayor cuidado posible para no invalidar todo el trabajo previamente realizado.

7.2.9. Lacado o pintado.

Otro método para dotar de color al aluminio es el lacado o pintado (actualmente el término lacado ha sustituido totalmente al de pintado). Como en cualquier proceso de deposición de una laca o pintura, la superficie del material debe de ser tratada químicamente, donde se desengrasa y se prepara para la adsorción del colorante.
El lacado utiliza siempre recubrimientos orgánicos tipo poliéster o epoxi, y se realiza con el llamado sistema electrostático en polvo horneable.
Este proceso precisa de una preparación de la superficie parecida a la que se emplea en el anodizado. Una de las fases de la preparación de la superficie suele incluir el cromatizado, del que ya se ha hablado en el apartado 7.1.
En la cabina de pintura se pulverizan los perfiles con la resina pigmentada con pistolas de proyección. Estas pistolas cargan eléctricamente las partículas de laca con carga positiva mientras las piezas a lacar están conectadas a tierra con un potencial negativo, con lo que el polvo es atraído y se deposita sobre la superficie de las piezas a lacar.
El horneado consiste en hacer pasar a las piezas cubiertas de laca por un horno que está a una temperatura de aproximadamente 200 ºC y con una duración de tratamiento de unos 20 minutos, obteniéndose el termoendurecido de la laca.

Evidentemente la pintura a utilizar varía según la aplicación de la pieza pintada, pero si se pretende un gran comportamiento en la intemperie y a la acción de la luz, se debe elegir la calidad de pintura adecuada. La más utilizada en aplicaciones de exteriores es la pintura poliéster ya que es capaz de filtrar los rayos ultravioletas. Otra posibilidad es que la pieza se utilice en interiores, para lo cual suelen utilizarse pinturas epoxi.

La vida útil del lacado sobre piezas de aluminio depende de la atmósfera a la que están expuestos y es equivalente a la de las piezas anodizadas.

8. Parte experimental.

En este apartado se va a exponer todo lo relativo a la realización práctica del anodizado de una serie de muestras de chapa de aluminio, precedido por los trabajos llevados a cabo para la adecuación de los aparatos o equipos. Se concluye con los ensayos de comprobación de la calidad de la capa de óxido obtenida sobre las muestras.

8.1. Planteamiento previo

Se van a procesar tres series de anodizado de 5 muestras cada una, tomadas de una chapa de aluminio 1050 de 2 mm de espesor. Las dimensiones de las muestras son 1 dm x 0,7 dm.
Se trata de obtener diferentes espesores de capa de óxido de aluminio para poder realizar una comparación de la protección que ofrecen los diferentes recubrimientos.
Las series han sido tres de las cinco "Clases" posibles dentro de la clasificación que ofrece la Norma ISO 7599:2010. En la figura 8.1 se presenta la tabla contenida en dicha Norma.

Clase	Espesor medio mínimo µm	Espesor local mínimo µm
AA 5	5,0	4
AA 10	10,0	8
AA 15	15,0	12
AA 20	20,0	16
AA 25	25,0	20
En el anexo C de la Norma ISO 7599 se dan reglas para la interpretación de espesor local y medio		

Figura 8.1: *Tabla de espesor medio mínimo y espesor local mínimo*

Las clases elegidas han sido las AA 10, AA 15 y AA 20, y se van a anodizar 5 muestras de cada clase, dando como resultado un total de 15 muestras a procesar y realizar con ellas los ensayos previstos en las normas de anodizado.

8.2. Descripción del equipo de anodizado.

8.2.1. Rectificador.

Este equipo es el que permite realizar la operación de anodizado. Se trata de un rectificador de corriente para obtener corriente continua a partir de corriente alterna y en la figura 8.2 se muestra una imagen del mismo.

Figura 8.2: *Equipo rectificador*

Detallando más profundamente el equipo, éste consta de un transformador, un autotransformador y un rectificador no controlado. Con eso es posible controlar la señal en función del resultado que se desea obtener en la salida. Algunos valores que es interesante conocer para el proceso de anodizado son los siguientes:

Potencia máxima = 5 kW
Tensión máxima en corriente continua = 100 V
Intensidad máxima en corriente continua = 50 A

Gracias a este equipo se obtiene la corriente eléctrica continua necesaria para que se produzca el proceso de anodizado, tal y como se ha comentado en la descripción en apartados anteriores.
El equipo está situado en el departamento de Ingeniería Mecánica, Energética y de Materiales. Disponía de unos medidores de tensión e intensidad no muy adecuados para este trabajo ya que el rango de medida debe estar más adaptado a los parámetros que se van a manejar. En la figura 8.3 se muestra una imagen de estos medidores, donde se puede apreciar fácilmente el rango de valores que son capaces de medir.

Figura 8.3: *Medidores incorporados al rectificador*

Se dotó al rectificador de un medidor diferente de valor de corriente y de tensión, que es capaz de indicar las medidas necesarias con una precisión mayor, quedando inutilizados los medidores incorporados en este equipo. El nuevo equipo de medida adaptado se trata de una central de medida DH96 AV, el cual queda mostrado en la siguiente figura 8.4.

Figura 8.4: *Nuevo medidor adaptado al equipo*

Este nuevo medidor está preparado para trabajar especialmente para aplicaciones con corriente continua, el cual es el caso que se va a tratar. Si se aprecia la imagen con detenimiento, se observa que el mismo medidor indica tanto el valor de la intensidad como de la tensión, por lo tanto ya no es necesario disponer de dos medidores como los que disponía en principio el equipo. El rango de medida es de 0-100 V en la medida de tensión y de 0-50 A en la medida de la cantidad de corriente.

8.2.2. Cuba electrolítica.

Las piezas a anodizar van a ser tratadas en una cuba de plástico de unas dimensiones adecuadas a la superficie y número de piezas a anodizar.

La cuba contiene el electrolito elegido para dicho proceso de anodizado, que en este caso es ácido sulfúrico, uno de los más utilizados en la actualidad como ya se ha mencionado anteriormente en este trabajo.
El proceso de anodizado genera calor por lo que es necesario refrigerar el baño para mantener bien controlada la temperatura del electrolito a la que se lleva a cabo el proceso. Esta refrigeración se logra con un serpentín de tubos colocados en el interior de la cuba, a través del cual pasa agua de suministro.
Tanto la cuba como el sistema de refrigeración se muestran en la figura 8.5.

Figura 8.5: *Imagen en la que se muestra la cuba y el sistema de refrigeración en su interior*

8.3. Diseño y construcción del embarrado, ánodo y cátodo.

Tras haber explicado el equipo de anodizado que va a ser utilizado en el desarrollo del trabajo, se procede a comenzar con el mismo. Para ello se necesita dotar a la cuba del embarrado que transporte la corriente desde la fuente de alimentación (el rectificador) hasta el ánodo y los cátodos.
Se distingue entre embarrado y ánodo y cátodo ya que se llamará ánodo y cátodo a la parte que se encuentra en contacto con el baño electrolítico. Interesa que el aluminio utilizado para la obtención de todas las partes sea buen conductor y por esa razón se utilizó el mismo aluminio puro (99,5 %) de la serie 1050, tanto para el embarrado, el ánodo y el cátodo, así como para las muestras a anodizar y estudiar. Esta elección se basa en que se trata del aluminio con mejores propiedades conductoras.
La figura 8.6 muestra una tabla que contiene los distintos elementos de su composición así como el porcentaje de cada uno de ellos.

Elemento	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
Porcentaje	0,13	0,24	0	0,01	0	0,01	0,01

Figura 8.6: *Composición del aluminio 1050 utilizado en el embarrado, cátodos, ánodo y en las muestras a anodizar*

8.3.1. Implementación de la cuba con embarrado, ánodo y cátodo.

Se ha pensado en disponer en la cuba de un solo ánodo y un cátodo doble. En la figura 8.7 se representa tal tipo de disposición donde el círculo representado se corresponde con la cuba. El cátodo doble permite obtener mayor igualdad de capa anódica en las dos caras de las muestras con las que se va a trabajar.

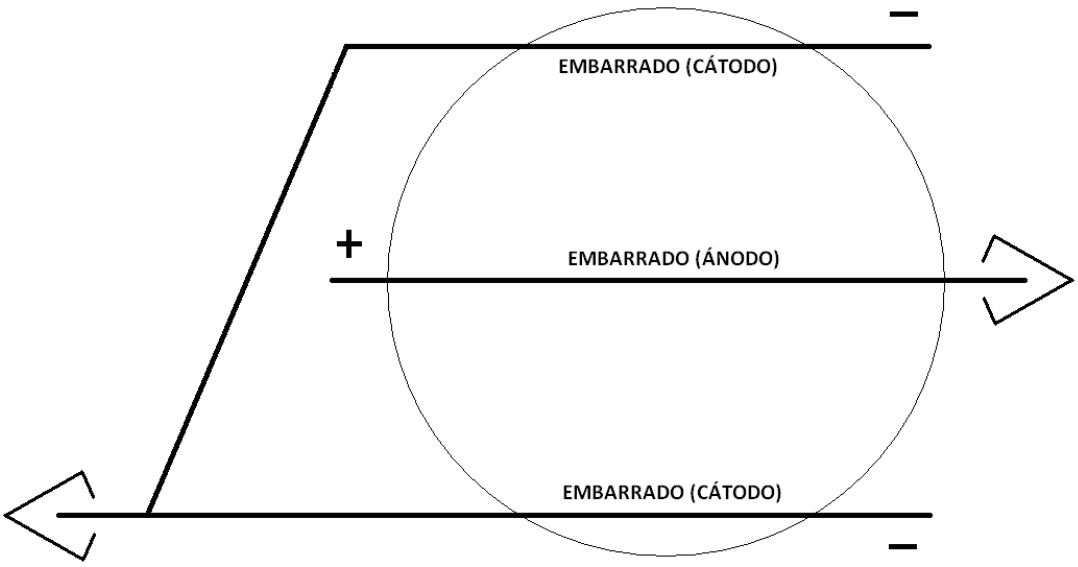


Figura 8.7: *Esquema del sistema diseñado para el anodizado*

Una de las dos pinzas a través de las cuales se transmite la corriente se conecta al embarrado de la que colgarán los cátodos y la otra se conecta al embarrado del que colgará el ánodo, como bien se puede apreciar en la figura 8.7.

En la figura 8.8, se muestran dos imágenes reales del embarrado de donde se van a colocar los cátodos (fotografía de la izquierda) y el ánodo (fotografía de la derecha).

Figura 8.8: *Fotografía de las partes del embarrado de las cuales colgarán el ánodo y los cátodos*

Para realizar la unión del embarrado en el cual se va a colocar el cátodo se pensó en varias opciones y finalmente se decidió por una unión atornillada en el extremo donde se conecta la pinza de corriente.
Para colocar en el embarrado las piezas verticales que van a hacer de cátodo (sumergidas en el electrolito) también se decidió que la solución más sencilla era una unión atornillada debido a que no es necesario quitarlas a lo largo de todo el proceso.
En la siguiente figura 8.9 se muestran con más detalle estos dos aspectos comentados.

Figura 8.9: *Detalle de la unión correspondiente al embarrado donde conecta la pinza (izquierda) y unión de los cátodos verticales (derecha)*

8.3.2. Muestras a anodizar y pinzas de contacto.

Como se ha mencionado previamente se decide la realización del anodizado de 15 muestras de aluminio de dimensiones 1 dm x 0,7 dm x 0,02 dm divididas en tres series que se han explicado en el apartado 8.1.

En la figura 8.10 se pueden ver cuatro de las chapas ya cortadas mencionadas en el párrafo anterior.

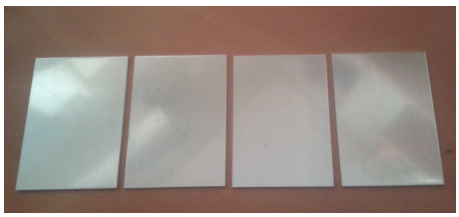


Figura 8.10: *Cuatro de las muestras que serán anodizadas*

Las piezas que hacen de ánodo es necesario tener la capacidad de ponerlas y quitarlas tras cada proceso de anodizado para realizar los estudios o análisis correspondientes. Por ello finalmente se decidió por fabricar, a partir de la misma chapa de la cual se han obtenido todas las piezas anteriores, una pinza de sujeción y contacto. Cabe comentar que estas pinzas se hicieron a partir de una pletina de 3,6 dm x 0,1 dm x 0,02 dm, que dobladas se obtiene el resultado que se ve en la figura 8.11.

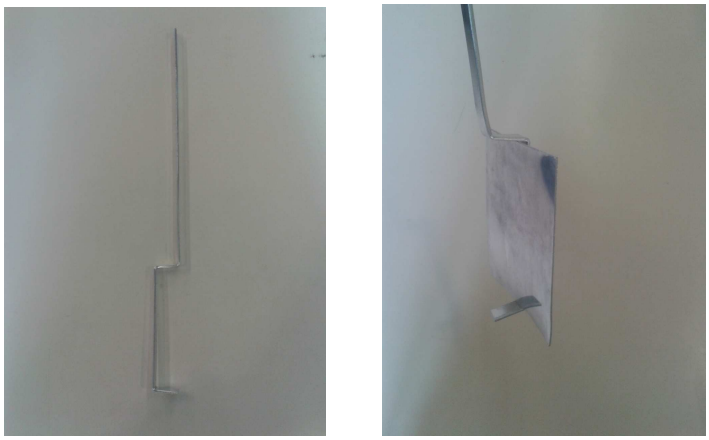


Figura 8.11: *Fotografías de la pinza de sujeción y contacto sin muestra a anodizar (izquierda) y con muestra a anodizar (derecha)*

Con ayuda de esta pinza, es posible colocar la pieza a anodizar con relativa facilidad y las dimensiones son exactas para que la pieza quede en la altura media del volumen total de electrolito. En la imagen 8.12 se muestra un detalle más preciso de la disposición en la que quedarán colocadas para observar como las piezas quedan en el centro del volumen del electrolito.

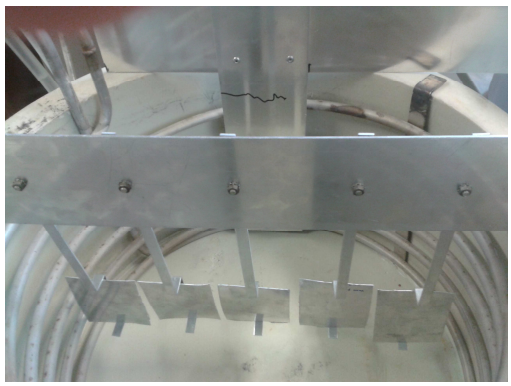


Figura 8.12: *Fotografía que muestra la disposición en la que quedarán las piezas a anodizar dentro de la cuba*

Un aspecto fundamental es que tras cada proceso de anodizado, las pinzas de sujeción y contacto se deben desanodizar para poder utilizarlas en otro proceso posterior. Este proceso se realiza para eliminar la capa de óxido que se ha formado durante el anodizado y la cual hace que la superficie de las pinzas no sea conductora. Para llevar a cabo este proceso se introducen las pinzas de sujeción y contacto en un baño de sosa cáustica durante aproximadamente diez minutos y a una temperatura de 60 ºC. Tras este proceso las pinzas están desanodizadas y preparadas para una nueva utilización.

Con todo lo explicado hasta el momento se consigue crear el diseño correcto del embarrado que soporta las piezas que van a hacer la función de ánodo y cátodo. En la

figura 8.13 se muestra una fotografía para poder ver claramente el equipo completo final.

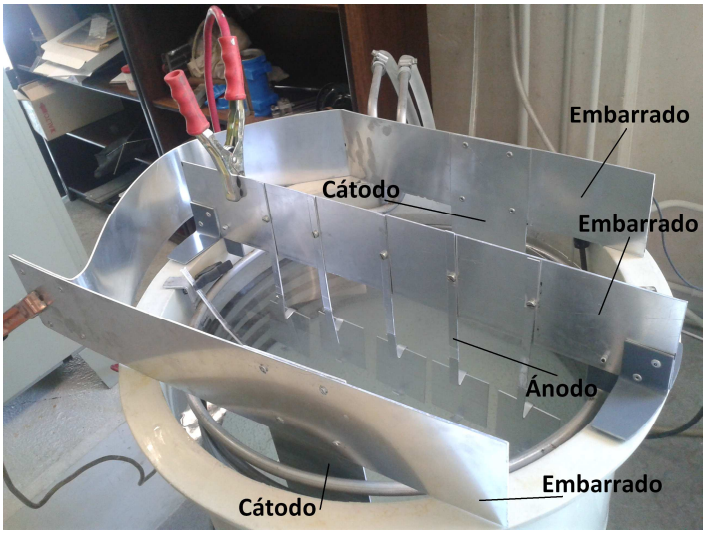


Figura 8.13: *Estado final del diseño obtenido para la estructura del ánodo y cátodo*

Se aprecia claramente en la figura 8.13 la distribución y colocación del embarrado. En este caso las piezas que hacen la función de cátodo ya están incorporadas ya que van a ser las mismas a lo largo de todo el proceso mientras que las piezas a anodizar se van a ir colocando conforme se realice el anodizado. Se puede ver también como el sistema de refrigeración está en el interior de la cuba y por lo tanto este hecho se ha tenido también en cuenta a la hora de diseñar la estructura.

8.4. Preparación y cálculos del proceso.

8.4.1. Preparación de la solución de ácido sulfúrico.

Se dispone de una cuba cilíndrica que llenada hasta un nivel cómodo para el trabajo contiene 47 litros.

Se va a preparar un baño electrolítico de una concentración del 20 % en peso de ácido sulfúrico comercial. Sabiendo la densidad del mismo (1,84 g/cm^3 = g/ml), para obtener un litro de disolución a la concentración que se pretende, el cálculo de la cantidad necesaria de ácido sería el siguiente:

$$200 \text{ g } H_2SO_4 \times \frac{1 \text{ ml}}{1{,}84 \text{ g}} = 108{,}7 \text{ ml de ácido sulfúrico}$$

Este sería el volumen necesario si el ácido sulfúrico fuera 100 % puro, lo cual es muy difícil de obtener. El ácido conocido como “puro” tiene una concentración de 96 %, por lo que realmente el volumen necesario es:

$$108{,}7 \text{ ml } H_2SO_4 \times \frac{100}{96} = 113{,}2 \text{ ml de ácido sulfúrico por litro de solución}$$

Para preparar 47 litros de solución los cálculos serían:

113,2 ml x 47 = 5320 ml = 5,3 litros de ácido sulfúrico

47 litros – 5,3 litros = 41,7 litros de agua

Por lo tanto para obtener el baño electrolítico deseado es necesario aportar 5,3 litros de ácido sulfúrico comercial y 41,7 litros de agua en el interior de la cuba.

8.4.2. Cálculo de la corriente aplicada.

Otro aspecto realmente fundamental es calcular la corriente que es necesario aplicar durante el proceso para cumplir con la intensidad a aplicar recomendada y que de esa manera se produzca el anodizado de una manera óptima.
El valor de esta corriente debe calcularse en función del área de aluminio sumergido en el electrolito. No sólo el área de las piezas a tratar sino también la parte de las pinzas de sujeción de dichas piezas sumergida en el electrolito, ya que toda esa área va a sufrir el anodizado aunque lógicamente lo que interesa analizar es únicamente el anodizado en las piezas. Cabe destacar que el canto tanto de las piezas como de las pinzas no se tiene en cuenta debido a su poca influencia en el resultado final por ser un valor excesivamente pequeño.
Dado que se van a realizar varias series de anodizado con el objetivo de obtener un espesor diferente en cada una de ellas, se decidió por anodizar en cada una de esas series 5 piezas como ya se ha mencionado en el apartado 8.1. Por lo tanto, sabiendo las dimensiones de las piezas, ya comentadas anteriormente en el apartado 8.3.2, se puede obtener el área total de las piezas sumergidas en el electrolito en cada serie a realizar:

Área de una pieza → 1 dm x 0,7 dm x 2 caras = 1,4 dm^2
Área total de las piezas → 1,4 dm^2 x 5 piezas = 7 dm^2

En el caso de las pinzas, únicamente una parte de las mismas está sumergida y por lo tanto, sabiendo la altura a la que llega el electrolito, es sencillo calcular el área sumergida:

Área de una pinza → (0,7 dm + 0,2 dm + 1 dm + 0,2 dm) x 0,1 dm x 2 caras = 0,4 dm^2
Área total de las pinzas → 0,4 dm^2 x 5 pinzas = 2,1 dm^2

Sumando los dos valores obtenidos anteriormente se calcula el área total de aluminio:

Área total de aluminio → 7 dm^2 + 2,1 dm^2 = 9,1 dm^2

La densidad de corriente recomendada a aplicar durante la realización del proceso es de 1,5 A/dm^2 de área a anodizar.

Como en todas las series se van a anodizar el mismo número de piezas, el área de aluminio que va a ser anodizado va a ser la misma y por ello se puede calcular la intensidad necesaria a aplicar:

$$\text{Intensidad total} \rightarrow 1{,}5\ A/dm^2 \times 9{,}1\ dm^2 = 13{,}6\ A$$

8.4.3. Preparación de la superficie.

Ya se ha indicado en el apartado 7.2.4.1 todo el proceso de preparación de la superficie necesario para tener las piezas preparadas para realizar el proceso de anodizado. A continuación se va a detallar más en concreto los elementos y parámetros utilizados en cada paso.
Todos los productos necesarios han sido cedidos por la empresa Jealser. Estos productos son fabricados por la empresa Proquimia y en el Anexo 3 se dan las hojas técnicas de estos productos.

El primer paso de la preparación de la superficie es la operación de desengrase que se realiza sumergiendo las piezas a tratar en la solución preparada para ello.
Para esta solución se ha utilizado el producto de nombre DETAL. Se decidió emplear una concentración recomendada del 2 % y trabajar con 1,5 litros de solución. Se vierte en un vaso de precipitados 1,5 litros de agua y 35 gramos del producto indicado para obtener la solución final deseada. La temperatura a la que se mantiene mientras se utiliza es de aproximadamente 50 ºC y el tiempo de tratamiento fue de 10 minutos.
En la figura 8.14 se muestra una imagen de la realización del proceso.

Figura 8.14: *Imagen de la realización del desengrase*

Después de la operación de desengrase se enjuagan en agua corriente las piezas colocadas en sus correspondientes pinzas.

Para realizar el ataque cáustico (satinado) se utilizó una solución ya preparada que fue proporcionada por la empresa citada Jealser.
Estaba compuesta de sosa cáustica y el aditivo ADIPRO S-32 de la misma casa citada anteriormente (Proquimia), con la composición recomendada en el folleto técnico de este producto (véase Anexo 3). En este caso se va a utilizar 1,5 litros del producto, los cuales se vierten en un vaso de precipitados. La temperatura a la cual se debe mantener durante su utilización es aproximadamente 55 ºC y el tiempo de tratamiento fue de 15 minutos.
En la figura 8.15 se muestra una imagen de la realización del ataque cáustico.

Figura 8.15: *Imagen de la realización del ataque cáustico sobre las piezas*

Nuevamente es necesario realizar un buen enjuague en agua corriente de las piezas que se están tratando.

La operación de satinado puede dejar en la superficie de las piezas y pinzas de contacto restos de hierro y/o silicio. Para eliminar estos restos se recurre al tratamiento de blanqueado o neutralizado.
Para este fin las muestras se sumergen en una solución de ácido nítrico al 20 % en peso y la temperatura de trabajo fue la temperatura ambiente. Se trabajará con una solución de 1,5 litros sabiendo que la densidad del mismo es 1,39 g/cm^3 = 1,39 g/ml y su pureza 65 %.

Con todo ello se calcula el volumen necesario de cada elemento para obtener la solución deseada.

$$300\ g \times \frac{100\ g}{65\ g} \times \frac{1\ ml}{1{,}39\ g} = 332\ ml \text{ de ácido nítrico}$$

$$1500\ ml - 332\ ml = 1168\ ml \text{ de agua}$$

Por lo tanto, para obtener la solución deseada se mezclan 332 ml de ácido nítrico y 1168 ml de agua. El tiempo de tratamiento en este caso fue de 10 minutos.

Antes de proceder a la anodización propiamente dicha de las muestras hay que enjuagar abundantemente éstas, colocadas ya en sus pinzas.

8.5. Realización anodizado.

Una vez que se ha descrito la preparación de la superficie de las muestras a anodizar se va a describir como se ha realizado la anodización de las muestras previstas.
En la figura 8.16 se expone una tabla en la que se dan los valores permitidos para los parámetros más importantes en la realización del anodizado.

Electrolito (% en peso)	Voltaje (V)	Densidad de corriente (A/dm^2)	Temperatura (ºC)
Ácido sulfúrico 15-20	12 a 20	1 a 2	18 a 22

Figura 8.16: *Tabla de parámetros para la realización del anodizado*

8.5.1. Capa de óxido de Clase AA 10.

La primera serie de piezas se van a anodizar para obtener una capa de óxido de aluminio de 10 µm (mínimo).

El equipo de anodizado es capaz de medir simultáneamente el valor de la tensión durante el proceso pero hay que tener en cuenta que conforme se va anodizando la superficie de la pieza va siendo aislante, por lo que es necesario ir aumentando la tensión progresivamente para mantener una intensidad constante de 13,6 A, calculada en el apartado 8.4.2. En este caso se comienza con una tensión aplicada de 13,3 V y se finaliza con 13,7 V.
La temperatura a lo largo de todo el proceso se ha mantenido a 20 ºC abriendo y cerrando la entrada de agua.

El tiempo total de anodizado es el mostrado en la figura 8.17.

Proceso	Tiempo
Anodizado Clase AA 10	25 minutos

Figura 8.17: *Tabla que indica el tiempo de anodizado*

8.5.2. Capa de óxido de Clase AA 15.

La segunda serie de piezas a anodizar se van a obtener con una capa de óxido de aluminio de 15 µm (mínimo).

Para todas las series que se van a realizar, ya se ha comentado que la superficie tanto de las piezas como de las pinzas va a ser la misma por lo tanto la intensidad aplicada va a ser exactamente la misma y la tensión aplicada va a ser muy similar. En este caso la tensión necesaria para mantener la intensidad de 13,6 A varía desde 12,8 V al inicio del proceso hasta 14,1 V al final del mismo.
De nuevo la temperatura se ha mantenido constante a 20 ºC a lo largo de todo el proceso.

El tiempo del proceso de anodizado se indica en la tabla de la figura 8.18.

Proceso	Tiempo
Anodizado Clase AA 15	42 minutos

Figura 8.18: *Tabla que indica el tiempo de anodizado*

8.5.3. Capa de óxido de Clase AA 20.

En la tercera y última serie de piezas que se van a anodizar se va a obtener una capa de óxido de aluminio de 20 µm (mínimo).

El valor de la tensión en este último caso comienza en 14,2 V y termina en 14,3 V consiguiendo mantener, como ya se ha mencionado, el valor de la intensidad en 13,6 A. En este último caso la temperatura de trabajo también ha sido de 20 ºC.

En la tabla de la figura 8.19 se muestra el tiempo del proceso de anodizado.

Proceso	Tiempo
Anodizado Clase AA 20	52 minutos

Figura 8.19: *Tabla que muestra el tiempo de anodizado*

8.6. Sellado.

El sellado de la capa anódica es la operación más importante de todo el proceso después de la del anodizado propiamente dicho.

Para este proceso se decidió realizar un sellado en frío, que es el proceso más habitual hoy en día.

Para ello se emplea un baño de agua desionizada a la que se le añade el aditivo de nombre SELLAL F-40 también de la casa Proquimia. La concentración recomendada del producto es 5 gramos por litro y la temperatura a la que se lleva a cabo esta parte del proceso es 30 ºC.
En la figura 8.20 se muestra una imagen de la realización del sellado.

Figura 8.20: *Imagen de la realización del sellado*

Es necesario agitar la solución para disolver completamente el aditivo y posteriormente controlar el pH de la disolución. Se preparó la solución y se midió el pH obtenido que fue 6,5, lo que está dentro de lo recomendado en el folleto técnico del producto. En la figura 8.21 se muestra el instrumento utilizado para controlar el pH de la disolución.

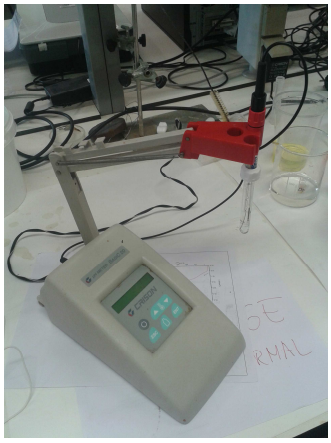


Figura 8.21: *Instrumento utilizado para controlar el pH*

El tiempo de sellado está en función del espesor de la capa anódica. En la tabla de la figura 8.22 se dan los tiempos empleados en el sellado de las muestras de las tres series realizadas.

Procesos	Tiempo
Muestras de Clase AA 10	8 minutos
Muestras de Clase AA 15	12 minutos
Muestras de Clase AA 20	19 minutos

Figura 8.22: *Tiempo del sellado sobre las piezas de las tres series*

Con esta operación del sellado de las muestras anodizadas termina la fase de anodización y sellado de todas las muestras previstas.

La próxima fase del proyecto es la realización de los ensayos de control de la calidad de las capas anódicas obtenidas.

8.7. Ensayos.

Para la realización de los ensayos que van a ser descritos en este capítulo se va a seguir, en lo aplicable, las directrices de las Normas UNE-EN ISO, tituladas:

UNE-EN ISO 7599. Anodización del aluminio y sus aleaciones. Especificaciones generales para recubrimientos de oxidación anódica sobre aluminio.

Los ensayos más adecuados para realizar sobre las piezas anodizadas son seis:

- ISO 2360. Recubrimientos no conductores sobre materiales base conductores no magnéticos. Medición del espesor de recubrimiento. Método por corrientes inducidas sensibles a la variación de amplitud.

- ISO 1463. Anodización del aluminio y sus aleaciones Recubrimientos metálicos y capas de óxido. Método de corte micrográfico.

- ISO 2143. Anodización del aluminio y sus aleaciones Estimación de la pérdida de poder absorbente de los recubrimientos anódicos de óxido después del sellado. Ensayo de la gota de colorante con tratamiento ácido previo.

- ISO 3210. Anodización del aluminio y sus aleaciones. Evaluación de la calidad del sellado de los recubrimientos anódicos de óxido por medición de la pérdida de masa después de la inmersión en solución fosfocrómica.

- ISO 2106. Anodización del aluminio y sus aleaciones. Determinación de la masa por unidad de superficie (densidad superficial) de los recubrimientos anódicos de óxido. Método gravimétrico.

- ISO 6988. Recubrimientos metálicos y otros recubrimientos no orgánicos. Ensayo al dióxido de azufre con condensación general de la humedad.

A continuación se pasa a describir la realización de los ensayos, los equipos empleados para ello y los resultados obtenidos.

8.7.1. Medida del espesor por corrientes inducidas (ISO 2360).

8.7.1.1. Principio del método.

Una sonda capaz de generar corrientes inducidas (o un instrumento con la sonda integrada) se coloca en la superficie del recubrimiento cuyo espesor se debe medir, visualizándose su valor en la pantalla del instrumento.

8.7.1.2. Instrumento: Medidor de espesores.

El instrumento que se va a explicar en este apartado será el que se utilizó para realizar la medición del espesor del anodizado tras el proceso. Dicho instrumento es el que se muestra en la figura 8.23 y como se puede ver es de la marca NEURTEK y modelo DUO-CHECK ST2.

Figura 8.23: *Imagen del instrumento utilizado para la medición de espesores*

Este aparato consta de dos partes principales. Por un lado el equipo medidor y por otro lado la sonda de medición. El equipo medidor ya se ha mostrado previamente en la figura 8.23 y en la figura 8.24 se puede ver la sonda.

Figura 8.24: *Imagen de la sonda en contacto con la muestra de aluminio*

La primera fase de la realización del ensayo es la calibración del instrumento para asegurarse de que las medidas tomadas a lo largo del estudio son correctas. Para ello se utilizan dos placas base, una con una muestra de un metal ferroso y otra con un metal no-ferroso. Esto es porque el instrumento mencionado es capaz de medir espesores en ambos tipos de metal y la calibración correspondiente hay que hacerla en función del material a analizar.
En la figura 8.25 se puede observar una imagen de las dos placas bases que se pueden utilizar.

Figura 8.25: *Placas base que se pueden utilizar para realizar la calibración del instrumento*

En este caso la placa base a utilizar es la de color rojo ya que es la correspondiente a una muestra de metal no-ferroso, como lo es el aluminio. Además, para estar seguros de que se está utilizando la placa base correcta, en la pantalla del instrumento aparecen las letras "Fe" o "NFe" en el momento en el que se coloca la sonda sobre la placa y así, si hay un error, poder detectarlo a tiempo.
Para realizar correctamente la calibración se coloca, encima de la muestra de metal de la placa base, un film de plástico como el que se muestra en la imagen de la figura 8.26.

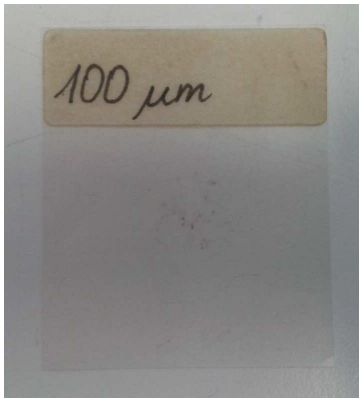


Figura 8.26: *Imagen del film de plástico que colocado sobre la placa base sirve para calibrar el instrumento*

Una vez colocado este film sobre la placa base, se realiza la medida del espesor poniendo en contacto la sonda con el plástico mencionado. Evidentemente, si el instrumento da una medida del valor que corresponde al film (en el caso de la imagen sería 100 µm) el instrumento está correctamente calibrado y preparado para comenzar la medida del espesor de la capa de anodizado sobre las muestras de aluminio.

Además del valor del espesor del anodizado sobre la muestra de aluminio, el instrumento es capaz de obtener otros datos tales como el número total de lecturas realizadas, el espesor máximo, el espesor mínimo, la media de todos los valores

medidos, la desviación estándar de los mismos o la obtención de un histograma. En cuanto a esto último, se debe precisar que el histograma que se obtiene se trata de un histograma de barras que indica el porcentaje de desviación del espesor de la capa con respecto a un valor de referencia preseleccionado.

8.7.1.3. Resultados de medidas con el instrumento de medición de espesor.

La medida de los espesores se realiza sobre la pieza entera de dimensiones 1 dm x 0,7 dm y el espesor que se quiere conseguir viene determinado por el nombre de la serie de la Clase a la que pertenece. En la tabla de la figura 8.1 se proporcionan los datos de espesor medio mínimo y local mínimo para cada una de las clases de anodizado.
Se va a llevar a cabo el ensayo sobre cuatro piezas de cada una de las series realizadas.

En el primer caso se muestra la tabla de la figura 8.27 con el espesor de la capa de óxido de aluminio (en micrómetros) en las piezas de clase AA 10. Se ha medido el espesor por ambas caras.

Probetas de Clase AA 10

	Cara A				**Cara B**			
	Espesor (µm)			**Media (µm)**	**Espesor (µm)**			**Media (µm)**
Nº 6	13	14	12	13,0	12	10	13	11,7
Nº 7	13	13	12	12,7	13	14	12	13,0
Nº 8	13	14	13	13,3	12	13	12	12,3
Nº 9	14	13	12	13,0	12	12	13	12,3

Figura 8.27: *Tabla que muestra las medidas de espesor en micrómetros en muestras de Clase AA 10*

Como se aprecia en esta tabla de la figura 8.27, el proceso de anodizado se ha realizado de manera correcta ya que el espesor obtenido está por encima del espesor medio mínimo. A la vista de los resultados expuestos en la tabla se puede comprobar que estos cumplen con lo exigido por la norma (figura 8.1).

En el segundo caso se muestra la tabla de la figura 8.28, donde al igual que en el caso anterior se detalla el espesor de la capa de óxido de aluminio en las piezas de Clase AA 15.

Probetas de Clase AA 15

	Cara A				Cara B			
	Espesor (µm)			**Media (µm)**	**Espesor (µm)**			**Media (µm)**
Nº 11	19	20	17	18,7	18	18	18	18,0
Nº 13	18	18	18	18,0	18	16	16	16,7
Nº 14	18	17	18	17,7	18	17	16	17,0
Nº 15	17	18	17	17,3	18	18	17	17,7

Figura 8.28: *Tabla que indica las medidas de espesor en micrómetros en muestras de Clase AA 15*

Al igual que lo comentado para el primer caso, los espesores medidos que se muestran en la figura 8.28 entran dentro de los valores requeridos ya que se encuentran por encima de 15 µm que es el espesor medio mínimo deseado pero en ningún caso es inferior a ese valor.

En el tercer y último caso se muestra la tabla de la figura 8.29 con la medida del espesor medido en las piezas de Clase AA 20.

Probetas de Clase AA 20

	Cara A				Cara B			
	Espesor (µm)			**Media (µm)**	**Espesor (µm)**			**Media (µm)**
Nº 16	25	24	23	24,0	25	23	22	23,3
Nº 18	23	24	22	23,0	23	23	22	22,7
Nº 19	24	25	23	24,0	24	23	22	23,0
Nº 20	24	24	23	23,7	25	24	22	23,7

Figura 8.29: *Tabla que muestra las medidas de espesor en micrómetros en muestras de Clase AA 20*

Se aprecia en la figura 8.29 que los valores medios del espesor de óxido de aluminio medidos son superiores al valor medio deseado de 20 µm y en ningún caso es inferior, por tanto el resultado en este caso también es válido.

Por último cabe destacar que las velocidades de formación de capa en las tres clases de anodizado cumple con bastante exactitud la fórmula que se ha expuesto al final del apartado 7.2.3.

8.7.2. Medida del espesor por corte micrográfico (ISO 1463).

8.7.2.1. Principio del método.

Se corta y se monta una porción de la muestra. Se prepara el corte transversal montado según una técnica apropiada de esmerilado, pulido y ataque químico. Se mide el espesor de la sección transversal del recubrimiento mediante una escala calibrada o con un microscopio dotado de un programa informático adecuado para medición de espesores.

8.7.2.2. Equipos.

a) Equipo de encapsular.

A la hora de realizar la medición del espesor de la capa anódica obtenida es necesario observar la pieza de una manera perpendicular con el fin de poder apreciar con detalle el espesor de la capa de óxido de aluminio obtenida. Para ello se debe encapsular la pieza a estudiar ya que de esta manera se facilita su manejo y la realización de posteriores pulidos.
Este proceso se realiza con un equipo destinado a realizar esta operación cuyo nombre es Struers LaboPress-3 y el cual se muestra en la imagen de la figura 8.30.

Figura 8.30: *Equipo de encapsulado*

La pieza a encapsular se introduce en una cavidad de la prensa hidráulica donde se coloca ya en la posición deseada en función de la parte de la misma que se desee analizar. Esto se consigue con ayuda de unos muelles que se muestran en la imagen de la figura 8.31, así como también se muestra la cavidad donde se introduce la pieza.

Figura 8.31: *Imagen de la cavidad donde se introduce la muestra así como los muelles utilizados para sujetarla en posición vertical*

Esto se debe a que una vez realizado el encapsulado, la parte a estudiar debe situarse en la zona plana del encapsulado y no en la zona curva, por lo que depende si se quiere estudiar la superficie o el espesor, la colocación de la pieza varía.

Una vez la pieza está colocada en el interior de la cavidad (figura 8.31) se introduce un material polimérico (resina acrílica) en forma de polvo, que en las condiciones aplicadas en el proceso pasa a un estado líquido y finalmente se solidifica dando como resultado la pastilla final. Siempre hay que introducir también una referencia de cada muestra indicando el número de pieza y el espesor de capa anódica que tiene para así tener todas las muestras perfectamente identificadas.
Previamente a aplicar las condiciones de trabajo hay que bajar el pistón que se encuentra en la cavidad donde se introduce la pieza unos 5 cm, para colocar la resina acrílica que se va a utilizar en este caso. En la parte superior se coloca la etiqueta identificativa ya que de esta manera al final del proceso esa parte quedará a la vista. Posteriormente se vuelve a introducir más cantidad de resina para que la cápsula obtenida tenga la altura suficiente para poder manejarla con facilidad. Una vez acabado este proceso se cierra la cavidad con el cierre que se observa en la derecha en la figura 8.30.
Las condiciones aplicadas pueden ser diferentes según el tipo de resina pero con la resina acrílica se va a aplicar una fuerza de 20 kN durante todo el proceso. Al inicio del mismo se mantiene un calentamiento a 180 ºC durante 6 minutos para producir el cambio de estado de polvo a líquido del material polimérico y tras ello se hace que se genere un enfriamiento durante 10 minutos para obtener la pastilla en forma sólida. Tras ese tiempo se retira la pieza ya encapsulada.

Para ello se utiliza una pequeña área de la pieza total anodizada, en este caso de 0,2 dm x 0,2 dm, y el resultado final de las piezas encapsuladas se muestra en la figura 8.32.

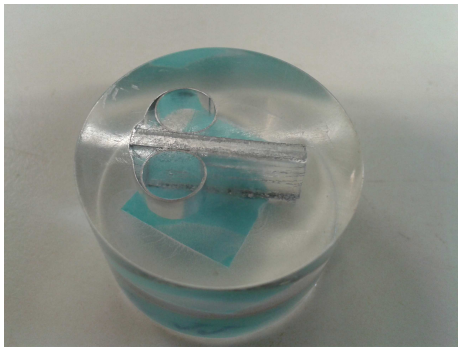


Figura 8.32: *Imagen de la pieza encapsulada*

b) Pulidora automática.

Una vez que se han obtenido las piezas encapsuladas se procede a la preparación de la superficie con el fin de dejarla en perfectas condiciones para los estudios posteriores, por lo que se debe lijar el trozo de la muestra primero con lijas y luego con paños de pulido de varias durezas para dejar la superficie lo más óptima posible.
Las lijas son de varios tipos según la densidad de grano, así se tienen lijas de 120, 180, 240, 320, 400, 600, 800 y 1200, siendo este número el grano en cada una de ellas. Por otro lado los granos del polvo de pulido (emulsión de diamante) son 9 µm, 6 µm, 3 µm y 1 µm.

Figura 8.33: *Imagen de lijas y paños de diamante*

Es importante que tenga las dos caras lisas porque si la muestra no es plana, el microscopio no será capaz de enfocar correctamente en todo su campo de visión, lo que hará que algunas zonas estén desenfocadas y no se puedan apreciar los detalles de la muestra de igual forma que si estuviera nivelada.
Se trata la superficie de la muestra lijando desde el mayor número de grano hasta el menor número de grano. Por tanto la primera lija en usarla con la superficie de la muestra es la de 120 y cuando se llega a la de 1200 se pasa a los paños de pulido y a las emulsiones de pasta de diamante, siendo el de 1 µm el último diamante a usar.
El uso de las lijas tiene como objetivo eliminar las rayas que pueda haber en la superficie para que no afecte en el estudio con el microscopio óptico. Por otra parte, los paños de pulido que se realiza con diamante tienen como objetivo eliminar las rayas que hayan podido producirse tras el primer lijado a la vez que intentar obtener la superficie lo más plana posible.

Cuando se utilizan las lijas se debe verter un poco de agua sobre la misma para no sobrecalentar en exceso la muestra y a su vez sirve para barrer de la superficie partículas que se puedan desprender. Cuando se utilizan los paños de pulido no se usa agua sino que se utiliza un lubricante (en este caso etilenglicol), del que es necesario realizar un goteo constante sobre el paño durante el proceso. Antes de iniciar el pulido se rocía el paño con un polvo de diamante en forma de spray correspondiente a cada uno de los paños elegidos. Los paños utilizados en este trabajo han sido del tipo MD-Mol ya que estos son adecuados para materiales blandos.

Figura 8.34: *Polvo de diamante en forma de spray*

Como ya se ha dicho se va a tratar la muestra cada vez con un tamaño de grano menor para ir disminuyendo las posibles rayas en la superficie, ya que con este proceso esas rayas van disminuyendo su tamaño y su relieve conforme menor es el tamaño de grano utilizado.

En este trabajo se va a utilizar una pulidora automática en la cual se van colocando las distintas lijas comentadas anteriormente. Este equipo trabaja a 300 rpm cuando se utilizan las lijas y a 150 rpm cuando se usan los paños de diamante, y el lijado con cada lija o paño de diferente densidad de grano se realiza durante un tiempo de tres minutos. En cuanto a la fuerza que se le aplica a las pastillas en la pulidora automática para tratar que el pulido sea el óptimo, cuando se utilizan las lijas la fuerza que se le aplica es 25 kN y utilizando los paños de diamante la fuerza disminuye y se aplica 20 kN.

En la figura 8.35 se muestra una imagen del equipo.

Figura 8.35: *Pulidora automática de la marca Struers LaboPol-5*

c) Microscopio óptico.

El equipo explicado en este apartado es con el que se va a analizar el espesor de la capa de óxido de aluminio creada en el proceso de anodizado. Se trata de un microscopio de la marca Olympus BX60M, el cual dispone de un rango de aumentos de 25, 100, 200, 500 y 1000, y en la figura 8.36 se muestra una imagen del mismo.

Figura 8.36: *Microscopio óptico*

Este microscopio está dotado de una cámara fotográfica digital, y para obtener y gestionar las microfotografías va acoplado a un ordenador. En el ordenador se trabaja con el programa informático llamado Analysis Image mediante el cual es posible visualizar la imagen de la pieza tanto en el ocular del microscopio como en la pantalla del ordenador.
Este programa informático permite realizar tareas de microscopía cuantitativa así como llevar a cabo acciones sobre la parte de la pieza que se está observando tales como medición de distancias, medición de ángulos o insertar figuras con el fin de destacar alguna parte en concreto de la superficie.

8.7.2.3. Resultados de medidas con el microscopio óptico.

Evidentemente se eligió una pieza de cada espesor de capa anódica para poder comparar el resultado final y por ello se utilizó la pieza Nº 6 de la Clase AA 10 (10 µm), Nº 11 de la Clase AA 15 (15 µm) y Nº 16 de la Clase AA 20 (20 µm).

En el primer caso que corresponde a la pieza Nº6 con capa anódica de Clase AA 10, se muestra en la figura 8.37 una imagen con el espesor sobreimpreso en cuatro puntos, gracias al programa informático que se dispone en el microscopio óptico.

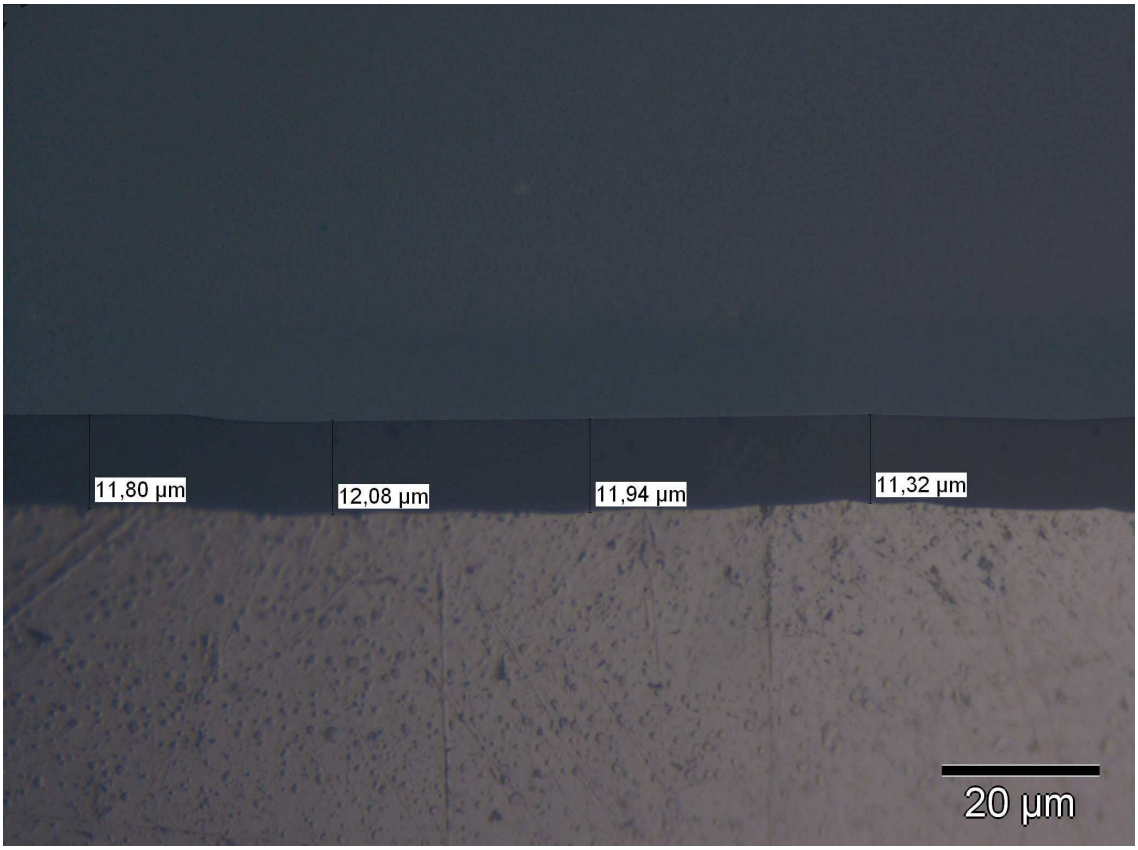


Figura 8.37: *Imagen de la medida del espesor en cuatro puntos*

La imagen ha sido obtenida con 1000 aumentos y en ella se puede apreciar claramente la capa de anodizado producida sobre la superficie de aluminio. Se han realizado cuatro medidas del espesor para así poder dar el resultado como la media de esas cuatro medidas.

Con las medidas que se observan en la figura 8.37 se calcula la media expresada en micrómetros ya que todas las medidas se miden en esta unidad:

$$\text{Espesor} = \frac{11{,}8 + 12{,}08 + 11{,}94 + 11{,}32}{4} = 11{,}8\ \mu\text{m}$$

El resultado obtenido es correcto ya que el valor medio obtenido es superior a 10 µm.

Para la segunda pieza Nº11 la cual pertenece a la Clase AA 15, se sigue el mismo proceso y se muestra en la figura 8.38 la imagen de la capa anódica y medidas en cuatro puntos como se ha hecho en el caso anterior.

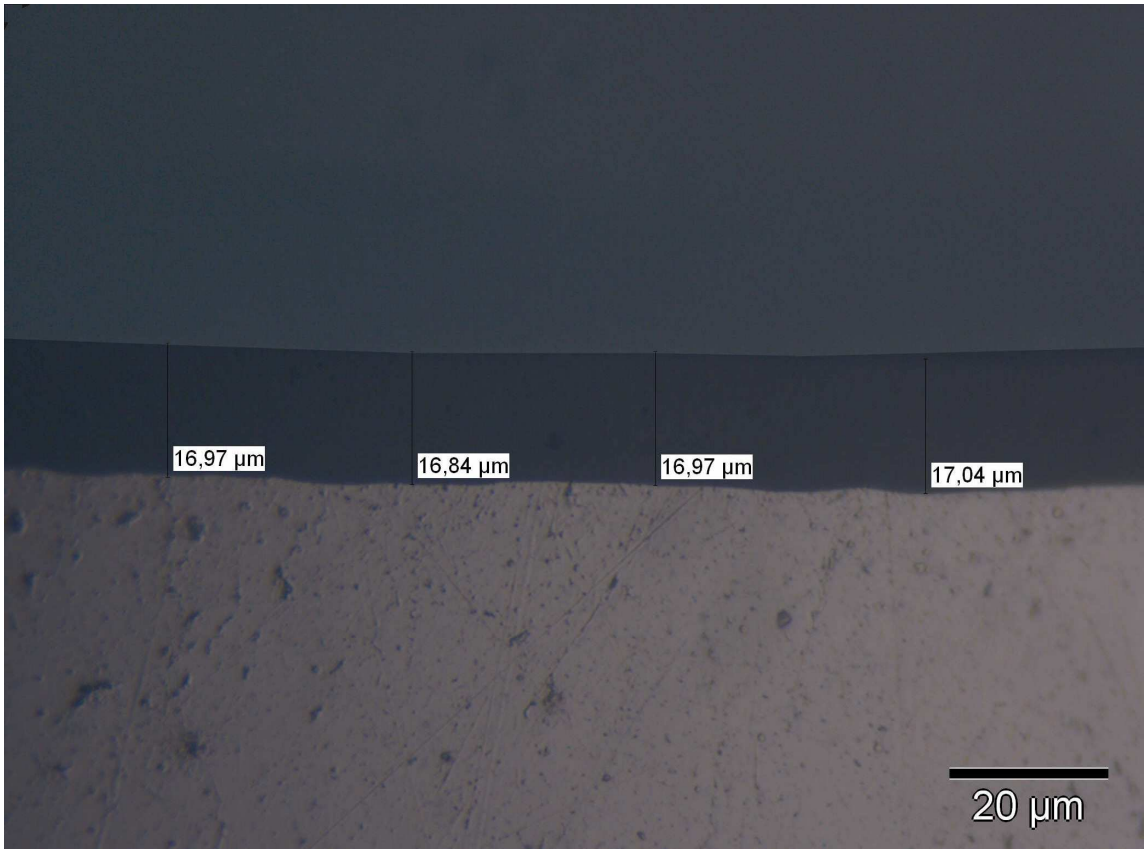


Figura 8.38: *Imagen de la medida del espesor en cuatro puntos*

De nuevo la imagen se ha obtenido a 1000 aumentos y se realizan las cuatro medidas del espesor que se observan en la figura 8.38, las cuales van a servir para calcular el valor medio.

Todas las medidas están expresadas en micrómetros y por tanto la media de la medida del espesor calculada en esas mismas unidades es la siguiente:

$$\text{Espesor} = \frac{16{,}97 + 16{,}84 + 16{,}97 + 17{,}04}{4} = 16{,}9\ \mu\text{m}$$

De nuevo el resultado obtenido es válido ya que el valor medio del espesor calculado es superior a 15 µm.

En el tercer y último caso la pieza analizada es la Nº16 que pertenece a la Clase AA 20 y se vuelve a mostrar una imagen de esta capa a 1000 aumentos en la figura 8.39.

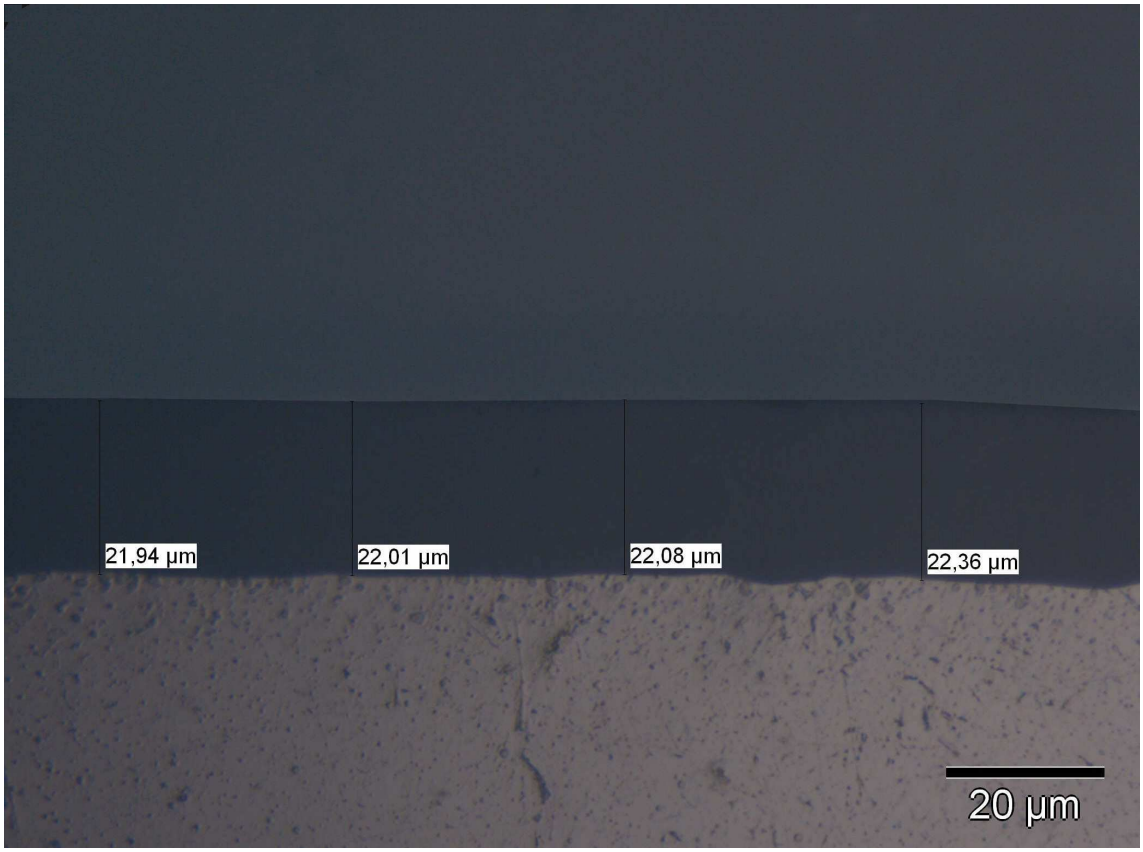


Figura 8.39: *Imagen de la medida del espesor en cuatro puntos*

El valor medio del espesor se calcula a continuación a partir de los cuatro valores medidos en la imagen de la figura 8.39. Esta medida se expresa en micrómetros debido a que las cuatro medidas del espesor también se miden en esta misma unidad:

$$\text{Espesor} = \frac{21{,}94 + 22{,}01 + 22{,}08 + 22{,}36}{4} = 22{,}1\ \mu\text{m}$$

Se observa que las medidas del espesor realizadas tienen un valor medio superior a 20 µm por lo que es un resultado correcto.

8.7.3. Estimación de la pérdida de poder absorbente del recubrimiento anódico (ISO 2143).

8.7.3.1. Principio del método.

Se somete una zona de la probeta, previamente desengrasada, a la acción de un ácido. Posteriormente, se observa la coloración obtenida mediante la aplicación de un colorante.

8.7.3.2. Procedimiento operativo.

Este ensayo se basa en el hecho de que, como ya se ha explicado anteriormente, una capa de óxido no sellada es porosa y absorbe fácilmente los colorantes. Sin embargo, por el contrario la porosidad de una capa bien sellada disminuye hasta tal punto que no presenta ninguna capacidad absorbente frente a los colorantes.
Para llevar a cabo el ensayo, primero se desengrasa la superficie de la pieza con un disolvente conveniente (en este caso etanol) y se frota con ayuda de un algodón, esponja húmeda y abrasivo suave. Tras esto, se lava con abundante agua y se seca.
En este momento se lleva a cabo el ataque con ácido previo para lo cual existen dos tipos de ácidos posibles a ser utilizados. Se optó por la solución ácida A la cual tiene un contenido de 25 ml de ácido sulfúrico y 10 g de fluoruro potásico por litro. Es suficiente con colocar una gota de esta solución ácida sobre la superficie. Estas disoluciones ácidas se dejan actuar sobre la superficie a una temperatura de aproximadamente 23 ºC y durante un minuto, al cabo del cual se lava cuidadosamente con agua corriente y se seca con algodón.
A continuación se deposita sobre la superficie antes recubierta por la disolución ácida, una gota de disolución de colorante. Al igual que en el caso de la solución ácida existen dos tipos de opciones a elegir y en este caso se utilizó la solución colorante A. Especificando más acerca de este colorante, se trata de una solución acuosa con un contenido de 5 g de Azul Sanodye 2LW (Índice de color azul Mordant 69) por litro ajustado a una temperatura de aproximadamente 23 ºC, a un pH de 5,0 ± 0,5 mediante una solución diluida de ácido sulfúrico. Se deja actuar esta disolución de colorante sobre la superficie durante un minuto y tras ello se vuelve a lavar con agua corriente. Se frota con la esponja limpia mojada en agua y el abrasivo suave indicado anteriormente durante aproximadamente treinta segundos. Por último se repite el lavado con agua y el secado.

Figura 8.40: *Solución ácida A y colorante A utilizados en el ensayo*

Evidentemente, si la capa de óxido está perfectamente sellada no se producirá absorción del colorante y por lo cual no se apreciará ninguna huella residual tras el ensayo.

Si se detecta alguna presencia de huellas residuales, se debe comparar con la tabla que se muestra en la figura 8.41, para clasificar la intensidad de la huella de acuerdo con la numeración indicada en la misma y así poder expresar la pérdida de poder absorbente de la superficie de la pieza.

Azul aluminio 2 LW	Rojo sanodal B 3 LW	Intensidad de la huella	Pérdida del poder absorbente
		5	nula
		4	muy débil
		3	débil
		2	media
		1	fuerte
		0	total

Figura 8.41: *Tabla de interpretación de resultados del ensayo de la gota de colorante*

8.7.3.3. Resultados.

Este ensayo se realiza sin la utilización de ningún instrumento ya que como ya se ha comentado previamente es necesario únicamente el uso de un ácido y un colorante correctamente elegidos para aplicarlos sobre la superficie de la pieza. En este caso la pieza a tratar tiene unas dimensiones de 0,5 dm x 0,2 dm.

De nuevo en este caso las piezas estudiadas son las mismas que en los dos casos anteriores, una de cada espesor posible. También se ha comentado previamente los pasos a seguir y tanto la solución ácida como el colorante utilizados en los tres casos.

La primera pieza en ser estudiada es la Nº6 la cual es de la Clase AA 10 y los sucesivos pasos que se llevan a cabo en el desarrollo de este estudio se muestran en las imágenes de la figura 8.42.

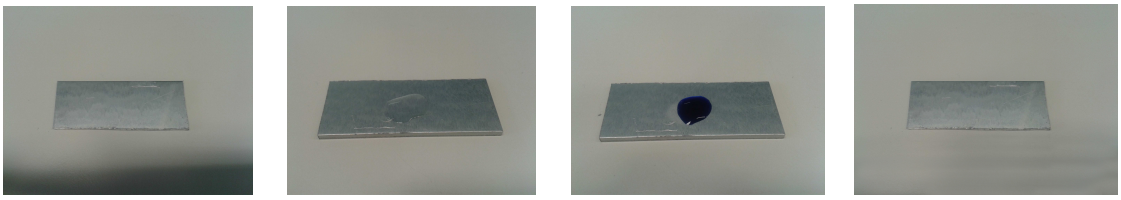


Figura 8.42: *Serie de imágenes donde se muestran los cuatro pasos correspondientes al ensayo realizado*

En estas imágenes de la figura 8.42 se puede apreciar de izquierda a derecha el estado inicial de la pieza, el momento en el que la superficie es atacada por la solución ácida, el momento en el que se coloca la gota de colorante en la superficie y por último el estado final de la pieza.
Como bien se puede observar, en el estado final de la pieza no hay ninguna marca de colorante por lo que el sellado en este primer caso ha sido realizado de manera correcta.

La segunda pieza a analizar es la Nº 11 que es de la Clase AA 15. Al igual que en el primer caso se muestran, en la figura 8.43, las imágenes en serie del proceso seguido en el ensayo.

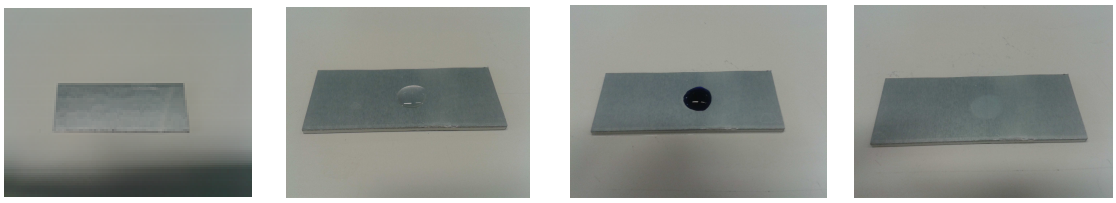


Figura 8.43: *Serie de imágenes que muestran los pasos llevados a cabo durante la realización del ensayo*

En las imágenes correspondientes a la figura 8.43 se puede ver de nuevo todos los pasos seguidos y en el estado final de la pieza se puede apreciar una ligera marca de colorante que se debe comparar con la tabla de interpretación de resultados mostrada en la figura 8.41.
En ella se comprueba la intensidad de la huella y se ve que es de un nivel 1, así que por lo tanto el resultado del sellado no es tan bueno como en el caso anterior pero sigue siendo un resultado correcto y por tanto el sellado se ha realizado también correctamente.

En el tercer caso se utiliza la pieza Nº 16 la cual pertenece a la Clase AA 20 y de nuevo se muestran en la figura 8.44 los sucesivos pasos llevados a cabo.

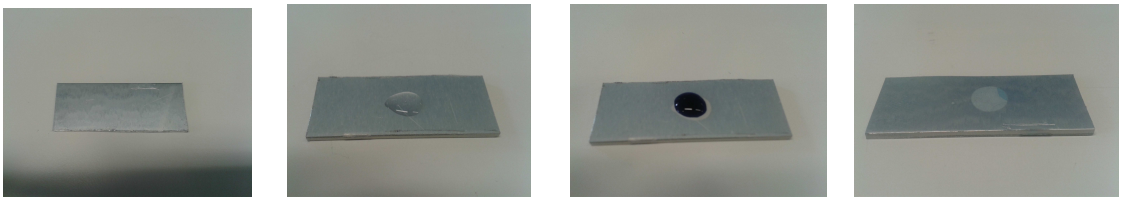


Figura 8.44: *Serie de imágenes en las cuales se muestran los pasos seguidos en el ensayo*

Se puede ver que el estado final de la pieza muestra una huella, pero se aprecia que es de un tono blanco y no del tono del colorante. Eso se puede deber a que el ácido ha atacado demasiado a la capa anódica y no que el sellado esté mal realizado, ya que en ese caso la huella debería de ser de color y no blanca.
Evidentemente también hay una pequeña huella de color y si se compara con la tabla de la figura 8.41 como se ha hecho en el caso anterior, la intensidad de la huella vuelve a ser de una intensidad de nivel 1 y por lo tanto el sellado llevado a cabo es correcto.

8.7.4. Evaluación de la calidad del sellado del recubrimiento anódico (ISO 3210).

8.7.4.1. Principio del método.

Un recubrimiento anódico de óxido sin sellar sobre aluminio se disuelve rápidamente en un medio ácido, mientras que un recubrimiento bien sellado resistirá mucho tiempo sin ataque apreciable.

8.7.4.2. Procedimiento operativo.

Hay dos posibles métodos para realizar este análisis, uno con tratamiento de ácido previo y otro sin tratamiento de ácido previo, el primero aplicado para recubrimientos destinado a fines arquitectónicos mientras que el segundo se utiliza para recubrimientos con fines decorativos o de protección. En este trabajo, el que se va a llevar a cabo es el segundo método.
Este método de ensayo se basa en el hecho de que las capas de óxido sin sellar o defectuosamente selladas se disuelven con relativa facilidad en una disolución ácida (en general se utiliza una solución acuosa de los ácidos fosfórico y crómico). Por el contrario, si la capa está perfectamente sellada resiste sin problemas la acción de esta disolución sin experimentar apenas pérdida de masa y por lo tanto resiste mucho tiempo sin ataque apreciable.
Para efectuar el ensayo se pesa y se mide la superficie de la pieza a analizar después de haberla desengrasado y secado. Se debe trabajar con una pieza de aproximadamente 1 dm^2 (en cualquier caso nunca inferior a 0,5 dm^2) y con una masa que no debe exceder de 200 g (medida con una precisión de 0,1 mg).

La pieza se desengrasa en un disolvente orgánico (por ejemplo acetona) a temperatura ambiente.
A continuación se sumerge durante 15 minutos y a una temperatura de aproximadamente 38 ºC en la disolución de ácido elegida, una solución acuosa que contiene por litro, 35 ml de ácido fosfórico y 20 g de óxido de cromo. Es muy importante que haya la mayor uniformidad posible de temperatura en la solución de ensayo y para ello se debe agitar continuamente.
Posteriormente se retira la pieza de la solución y se pesa de nuevo tras ser lavada (primero con agua corriente y después en agua desionizada) y secada. La pérdida de masa por unidad de superficie (δ), expresada en miligramos por decímetro cuadrado, queda determinada al aplicar la siguiente fórmula:

$$\delta = \frac{m1 - m2}{S}$$

en la cual:
m_1 es la masa de la pieza (en miligramos) antes de la disolución.
m_2 es la masa de la pieza (en miligramos) después de la disolución.
S es la superficie anodizada de la pieza (en decímetros cuadrados) sometida a la acción de disolución.

8.7.4.3. Instrumento: Balanza analítica.

En el desarrollo de este ensayo que requiere realizar mediciones de masa se utiliza la balanza analítica que se muestra en la imagen de la figura 8.45.

Figura 8.45: *Balanza analítica*

Esta balanza analítica tiene una precisión de 0,1 mg que es la mínima necesaria según la norma para los ensayos que se van a llevar a cabo.

8.7.4.4. Resultados.

Para este caso se utiliza la balanza analítica mencionada en el apartado 8.7.4.3 y las piezas que se utilizan son de dimensiones 1 dm x 0,7 dm = 0,7 dm^2.

Como el anodizado se ha realizado sobre las dos caras de la pieza así como también por los bordes, es necesario calcular dicho área total para llevar a cabo el cálculo de manera correcta.
Conociendo el área de una cara que se ha mencionado al inicio de este apartado, se calcula que el área de las dos caras de la pieza es 1,4 dm^2.
En el caso de los bordes, el área del borde de mayor longitud es 0,02 dm^2 y del borde de menor longitud es 0,014 dm^2, por lo tanto el área de los cuatro bordes es 0,068 dm^2.
Con esto se calcula que la superficie total que se ha anodizado es 1,468 dm^2 y este dato es esencial ya que el resultado final se obtiene por unidad de superficie.

Las piezas que se van a utilizar tienen cada una un espesor de capa anódica diferente y son la pieza Nº9 de la Clase AA 10, la pieza Nº15 de la Clase AA 15 y la pieza Nº20 de la Clase AA 20.

Para conocer la masa de capa anódica que se pierde y en función de ello comprobar la calidad del sellado, se va a medir en cada caso la masa antes y después del proceso en la solución fosfocrómica, que tiene lugar durante 15 minutos.
Cabe destacar también que a la hora de realizar los cálculos la masa se mide en miligramos y la superficie en decímetros cuadrados.

En el primer caso, para la pieza Nº9 de la Clase AA 10 los valores de las masas son los siguientes.

$$m_1 = 36{,}5508 \text{ g}$$
$$m_2 = 36{,}5320 \text{ g}$$

Con los tres valores medidos se calcula la pérdida de masa por unidad de superficie de la capa anódica, expresada en miligramos por decímetro cuadrado:

$$\delta = \frac{36550{,}8 - 36532{,}0}{1{,}468} = 12{,}806 \text{ mg/dm}^2$$

En el segundo caso se va a analizar la pieza Nº15 que pertenece a la Clase AA 15, y la masa antes y después de la inmersión en la solución fosfocrómica se indican a continuación:

$$m_1 = 36{,}8887 \text{ g}$$
$$m_2 = 36{,}8572 \text{ g}$$

Al igual que en el caso anterior con todo ello es posible calcular la pérdida de masa de capa anódica, expresada en miligramos por decímetro cuadrado.

$$\delta = \frac{36888,7 - 36857,2}{1,468} = 21,458 \text{ mg/dm}^2$$

En el tercer y último caso se estudia la pieza Nº20 la cual pertenece a la Clase AA 20, y a continuación se indican la masa inicial y tras haber llevado a cabo el ataque en la solución fosfocrómica:

m_1 = 36,8378 g
m_2 = 36,6678 g

Con los datos medidos se calcula la pérdida de masa de la capa anódica, expresada en miligramos por decímetro cuadrado.

$$\delta = \frac{36837,8 - 36667,8}{1,468} = 115,804 \text{ mg/dm}^2$$

En la Norma ISO 7599:2010 se permite, para la mayoría de las aplicaciones, un valor máximo aceptable de pérdida de masa de recubrimiento anódico de 30 mg/dm^2.
Como puede verse, el resultado de los ensayos de las capas anódicas Clase AA 10 y Clase AA 15 cumple con esta recomendación.
Sin embargo, el ensayo para la probeta de la Clase AA 20 da un resultado inexplicable. No fue posible repetir el ensayo por falta de muestra suficiente pero de todos modos el ensayo de la gota de colorante, que también mide la calidad del sellado, dio satisfactorio para la muestra de Clase AA 20.

8.7.5. Determinación de la masa del recubrimiento anódico (ISO 2106).

8.7.5.1. Principio del método.

Se disuelve mediante una mezcla de ácido fosfórico y de cromo (VI) de concentración especificada, el recubrimiento anódico de óxido de una probeta pesada cuya área se conoce, sin atacar significativamente el metal base.
Tras la disolución del recubrimiento, se vuelve a pesar la probeta y se calcula la pérdida de peso sufrida. La pérdida de peso se refiere a la unidad de área cubierta por el recubrimiento, expresándose en miligramos de recubrimiento por decímetro cuadrado de superficie.

8.7.5.2. Procedimiento operativo.

Siempre según la norma mencionada, este método de ensayo se basa en disolver el recubrimiento anódico de óxido de una pieza conocida utilizando una solución acuosa especificada de trióxido de cromo y ácido fosfórico a la temperatura de ebullición. El

tiempo en el que la pieza debe estar sumergida en la solución es 10 minutos y se debe aplicar una agitación eficaz sobre la misma. Esta solución tiene la propiedad de disolver el recubrimiento de óxido sin atacar sensiblemente al metal base, conociendo la masa y el área de la pieza.
Se obtiene por pesada la masa de la pieza en estudio antes y después de la disolución de la capa anódica por la mezcla fosfocrómica. Con esos datos se calcula la pérdida de masa sufrida (expresado en miligramos de recubrimiento por decímetro cuadrado de superficie).
Un aspecto fundamental a controlar para poder aplicar este método de análisis es que la superficie de la pieza a ensayar debe tener un área comprendida entre 0,08 y 1 dm^2 y su masa no debe sobrepasar los 100 g.
La norma especifica repetir el proceso hasta pesada constante.
En la siguiente fórmula se muestra el cálculo que es necesario realizar para obtener la masa por unidad de superficie del recubrimiento (ρ), expresada en miligramos por decímetro cuadrado:

$$\rho = \frac{m1 - m2}{S}$$

donde:
m_1 es la masa (en miligramos) de la pieza antes de la disolución.
m_2 es la masa (en miligramos) de la pieza después de la disolución.
S es la superficie (en decímetros cuadrados) de la pieza ocupada por el recubrimiento cuya masa se mide.

La densidad del recubrimiento depende de la aleación analizada, del proceso de anodización y del sellado, pero en general el valor de la densidad puede variar entre 2,3 y 3 g/cm^3.
En el caso que se va a tratar en este trabajo (recubrimientos delgados de aluminio y sus aleaciones sin cobre producidos bajo corriente continua en solución de ácido sulfúrico a una temperatura de aproximadamente 20 ºC) se puede suponer una densidad de 2,6 g/cm^3 para recubrimientos sellados.

8.7.5.3. Resultados.

Para el desarrollo de este quinto análisis en el cual se ha estudiado la masa del recubrimiento anódico por unidad de superficie se utiliza la balanza analítica mencionada en el apartado 8.7.4.3 y la pieza con la que se va a realizar el estudio es de dimensiones 0,8 dm x 0,7 dm = 0,56 dm^2.

Las piezas utilizadas para este análisis son las mismas que han sido utilizadas para el anterior por lo que lógicamente cada una de ellas posee un espesor nominal diferente ya que son de diferentes clases (Clase AA 10, Clase AA 15 y Clase AA 20).

Como ya se ha comentado en el apartado 8.7.5.2 se debe medir la superficie de las piezas a analizar y la masa tanto antes como después de la inmersión en la solución fosfocrómica. En este último caso la medición de la masa se debe llevar a cabo hasta que el valor sea constante con lo que se deben realizar varias medidas. Es importante destacar que se va a considerar que la masa es constante cuando la unidad de miligramo sea la misma en dos medidas consecutivas.
La superficie de las piezas va a ser la misma para los tres casos ya que se han cortado con las mismas medidas ya mencionadas al inicio de este apartado, por lo tanto la superficie es 0,56 dm^2.
Al igual que sucedía en el ensayo anterior, se debe calcular la superficie total en la que se ha producido el anodizado y por ello hay que tener en cuenta ambas caras de la pieza y los bordes de la misma. Sabiendo la superficie de una cara ya mencionada líneas más arriba se sabe que la superficie total de las dos caras es 1,12 dm^2.
En el caso de los bordes, se debe tener en cuenta que la pieza a analizar ha sido cortada y por tanto uno de los bordes de menor longitud no se encuentra anodizado. Por ello se debe incluir únicamente uno de los bordes de menor longitud.
La superficie del borde de mayor longitud es 0,016 dm^2 y la del borde de menor longitud es 0,014 dm^2, por lo tanto la superficie total de los bordes en la que se ha producido el anodizado es 0,046 dm^2.
Con esto se calcula que la superficie total que se ha anodizado es 1,166 dm^2 y este dato es esencial ya que el resultado final se obtiene por unidad de superficie.

Debe saberse que para realizar los cálculos, la unidad de masa debe ser el miligramo y la unidad de superficie el decímetro cuadrado.

En el primer caso se analiza la pieza Nº 6 que pertenece a la Clase AA 10, y a continuación se indica la masa de la misma antes y después del proceso en la solución fosfocrómica durante un tiempo de 10 minutos. Para indicar la masa final de la pieza se hace uso de la tabla de la figura 8.46 ya que son necesarias varias medidas hasta que el valor es constante.

$$m_1 = 28{,}9660 \text{ g}$$

	Medida 1	**Medida 2**	**Medida 3**	**Medida 4**	**Medida 5**	**Medida 6**	**Medida 7**
m_2	28,9565 g	28,8752 g	28,6931 g	28,5611 g	28,5463 g	28,5445 g	28,5443 g

Figura 8.46: *Tabla que indica las sucesivas medidas de masa hasta un valor constante*

Dado que en las dos últimas medidas es constante hasta la unidad de miligramo se considera este último valor como válido, tal y como se ha explicado anteriormente.

$$m_2 = 28{,}5443 \text{ g}$$

Con esos tres valores se calcula la masa del recubrimiento anódico por unidad de superficie, expresada en miligramos por decímetro cuadrado:

$$\rho = \frac{28966{,}0 - 28544{,}3}{1{,}166} = 361{,}663 \text{ mg/dm}^2$$

Del mismo modo se va a analizar la segunda pieza Nº11 la cual tiene un recubrimiento anódico de Clase AA 15. Se indica la masa inicial y también la masa tras las sucesivas inmersiones en la solución fosfocrómica, para lo cual es necesario mostrar la tabla de la figura 8.47 con las sucesivas pesadas.

$$m_1 = 29{,}2370 \text{ g}$$

	Medida 1	**Medida 2**	**Medida 3**	**Medida 4**	**Medida 5**	**Medida 6**	**Medida 7**
m_2	29,1833 g	29,0870 g	28,7318 g	28,6878 g	28,6709 g	28,6686 g	28,6685 g

Figura 8.47: *Tabla que indica las sucesivas medidas de masa hasta un valor constante*

De nuevo al ser constante en las dos últimas medidas hasta la unidad de miligramo se toma este valor como correcto.

$$m_2 = 28{,}6685 \text{ g}$$

Con los datos obtenidos se calcula la masa del recubrimiento anódico por unidad de superficie en este segundo caso, expresada en miligramos por decímetro cuadrado:

$$\rho = \frac{29237{,}0 - 28668{,}5}{1{,}166} = 487{,}564 \text{ mg/dm}^2$$

En el tercer caso se analiza la pieza Nº16 con un recubrimiento anódico de Clase AA 20 determinando la masa antes y después del tratamiento con la solución fosfocrómica. Se muestra la tabla de la figura 8.48 con todos los valores medidos de masa final pero en este caso ha sido necesaria una medición menos para conseguir un valor constante.

$$m_1 = 29{,}3711 \text{ g}$$

	Medida 1	**Medida 2**	**Medida 3**	**Medida 4**	**Medida 5**	**Medida 6**
m_2	29,2932 g	28,7664 g	28,6827 g	28,6639 g	28,6557 g	28,6554 g

Figura 8.48: *Tabla que indica las sucesivas medidas de masa hasta un valor constante*

Al ser constante hasta la unidad de miligramo en los dos últimos valores medidos se toma como válido éste último.

$$m_2 = 28{,}6554 \text{ g}$$

Con los valores calculados se obtiene la masa del recubrimiento anódico por unidad de superficie, expresada en miligramos por decímetro cuadrado:

$$\rho = \frac{29371{,}1 - 28655{,}4}{1{,}166} = 613{,}807 \text{ mg/dm}^2$$

Se puede observar como la masa del recubrimiento anódico es, en cada caso, mayor conforme mayor sea el espesor de la capa anódica, lo cual es lógico ya que cuanto mayor sea el espesor más masa deberá tener tratándose de la misma superficie analizada.
Si, como se ha mencionado en el apartado 8.7.5.2., se supone una densidad para el óxido de aluminio obtenido de 2,5 g/cm^3, se puede obtener como resultados de masa/área el espesor de la capa ensayada. Haciendo las operaciones pertinentes se obtienen unos espesores de capa en las tres clases bastante acordes con las mediciones realizadas tanto por el equipo DUO-CHECK ST2 como por el microscopio óptico.

Clase AA 10 → 12,4 µm
Clase AA 15 → 16,7 µm
Clase AA 20 → 21,0 µm

8.7.6. Ensayo de corrosión en atmósferas artificiales (ISO 6988).

8.7.6.1. Principio del método.

Es posible estimar la resistencia de materiales a una atmósfera que contiene humedad condensada y dióxido de azufre, siendo un método apropiado para recubrimientos metálicos y no orgánicos, por lo que es ideal en este trabajo.
Este método se basa en que el aire húmedo que contenga dióxido de azufre produce rápidamente una corrosión que puede ser detectada fácilmente sobre numerosos metales. Por ello es un ensayo conveniente para detectar presencia de porosidad u otro tipo de defectos en los recubrimientos así como una deficiencia en la resistencia a la corrosión asociada a composiciones de aleaciones. Las condiciones de exposición pueden variar ya sea produciéndose de manera continuada o bien realizando ciclos de exposición, siendo este último caso el elegido en este trabajo.

8.7.6.2. Proceso operativo.

En este trabajo se va a hacer un ensayo de Kesternich mediante el cual se determina el grado de resistencia de los materiales por atmósfera gaseosa y de humedad condensada. Es decir, el ensayo consiste en crear atmósferas artificiales con condiciones concretas y así someter a las piezas al ambiente simulado que se desee. Este ensayo se utiliza para simular la contaminación industrial y urbana que se genera como consecuencia de la liberación de SO_2 a la atmósfera procedente de combustibles fósiles, y con la presencia del oxígeno del aire se convierte en SO_3. A su vez, en presencia del vapor de agua se crea el ión sulfúrico responsable de la corrosión.
Para llevar a cabo el proceso se introducen en el fondo de la cámara de ensayo 2 litros de agua destilada que posea una conductividad de 500 µS/m o inferior tras lo cual se colocan las muestras y se cierra herméticamente la puerta de la cámara. A continuación se introducen 2 litros de dióxido de azufre y se aumenta la temperatura del interior de la cámara hasta alcanzar 40 ºC en aproximadamente una hora y media. Es necesario mantener y controlar la temperatura para que se mantenga estable durante el proceso. Si se realiza un ensayo continuo superior a 24 horas se debe sustituir el agua y el dióxido de azufre tras cada período de 24 horas y si se realiza un ensayo de ciclos, como es este caso, esta sustitución se lleva a cabo antes de comenzar el ciclo, que generalmente duran también 24 horas. Es posible combinar un ciclo en el interior de la cámara y un ciclo a atmósfera ambiente donde la temperatura en este último caso debe ser de 23 ºC y la humedad relativa inferior al 75 %.
Este último método es el elegido para llevar a cabo en este caso ya que el ensayo propio de Kesternich comprende un ciclo de 24 horas dividido en dos partes. La primera parte consiste en 8 horas con la cámara cerrada con las condiciones anteriormente mencionadas y pasado este tiempo la segunda parte consiste en otra etapa de 16 horas en las cuales las piezas están expuestas a la temperatura ambiente.
Al terminar el período de ensayo se deben sacar las muestras de la cámara y antes de ser analizadas, deben mantenerse suspendidas libremente en una atmósfera normal hasta que todos los productos de corrosión líquidos se hayan solidificado.
A la hora de evaluar los resultados hay varias opciones ya que es posible analizar la modificación de la masa, observar la superficie con el microscopio o analizar una posible modificación de las propiedades mecánicas. En este caso en particular se van a realizar observaciones sobre la superficie de las piezas con el objetivo de comparar el comportamiento y estado final entre ellas.

8.7.6.3. Equipo: Equipo de ensayo de corrosión.

El equipo necesario para llevar a cabo el ensayo de corrosión consta principalmente de una cámara de ensayo con puerta hermética y distintos componentes adicionales que se van a nombrar a continuación.
Debido a las condiciones que se van a aplicar en el interior de la cámara todos los materiales utilizados en la construcción de la cámara deben resistir la acción del

dióxido de azufre en presencia de humedad y a su vez no deben emitir gas o vapor que modifique la corrosión de las piezas. Tanto el fondo como las partes inferiores de las paredes son capaces de calentarse y de contener la cantidad necesaria de dióxido de azufre disuelto sin riesgo de fuga. El techo tiene una inclinación de 12º respecto al plano horizontal para que la humedad que se condense a lo largo del proceso sobre una de ellas o sobre sus soportes no caiga sobre las muestras que se encuentran en un nivel más bajo en el interior de la cámara.
Evidentemente el equipo también se compone de un regulador de temperatura para conocer en todo momento su valor en el interior de la cámara. En el interior de la misma es posible alcanzar una temperatura de 40 ºC en una hora y media, que son las condiciones en las que se va a realizar el ensayo. También posee una tubería de gas ya que es necesario introducir gas en el interior de la cámara así como una fuente de dióxido de azufre con el objetivo de suministrar en cada caso la cantidad necesaria.
En la figura 8.49 se muestra una imagen del equipo utilizado.

Figura 8.49: *Equipo utilizado para el ensayo de corrosión compuesto por la cámara y la fuente de dióxido de azufre*

8.7.6.4. Resultados.

En el este último ensayo se va a analizar, como ya se ha comentado previamente, la corrosión que sufren las piezas en unas condiciones severas de humedad y de contacto con dióxido de azufre. Para ello se van a utilizar dos piezas sin recubrimiento anódico, dos piezas de la Clase AA 10 (piezas Nº 7 y 8), dos piezas de la Clase AA 15 (piezas Nº 13 y 14) y dos piezas de la Clase AA 20 (piezas Nº 18 y 19).
En la figura 8.50 se muestra una imagen en la que se puede ver claramente la colocación de todas las piezas en el interior de la cámara hermética.

Figura 8.50: *Colocación de las piezas en el interior de la cámara del equipo de corrosión*

Se van a realizar cinco ciclos de 24 horas cada uno separados en dos partes, la primera de 8 horas con la cámara cerrada y las otras 16 horas con la cámara abierta.

Tras el primer ciclo se muestran las imágenes de las piezas en la figura 8.51.

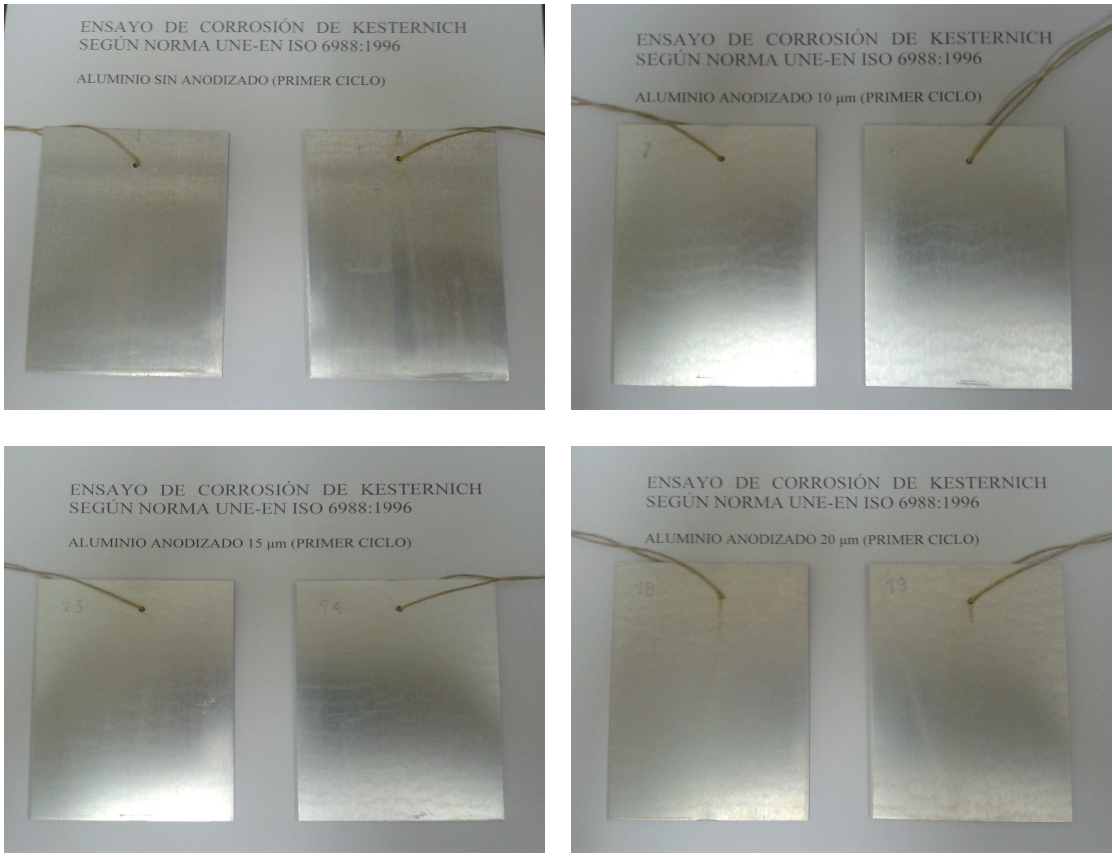


Figura 8.51: *Serie de imágenes de las piezas tras el primer ciclo*

En todas ellas se puede apreciar que la superficie no ha sufrido los efectos del ambiente corrosivo y por tanto después del primer ciclo cabe destacar que el comportamiento de las piezas es óptimo.

Evidentemente el primer ciclo es el más suave de soportar por parte de las piezas ya que no ha sufrido anteriormente ningún otro tipo de ambiente corrosivo, pero a pesar de ello el estado de las piezas es realmente bueno.
Tras el segundo ciclo las imágenes de las piezas a analizar se muestran en la figura 8.52.

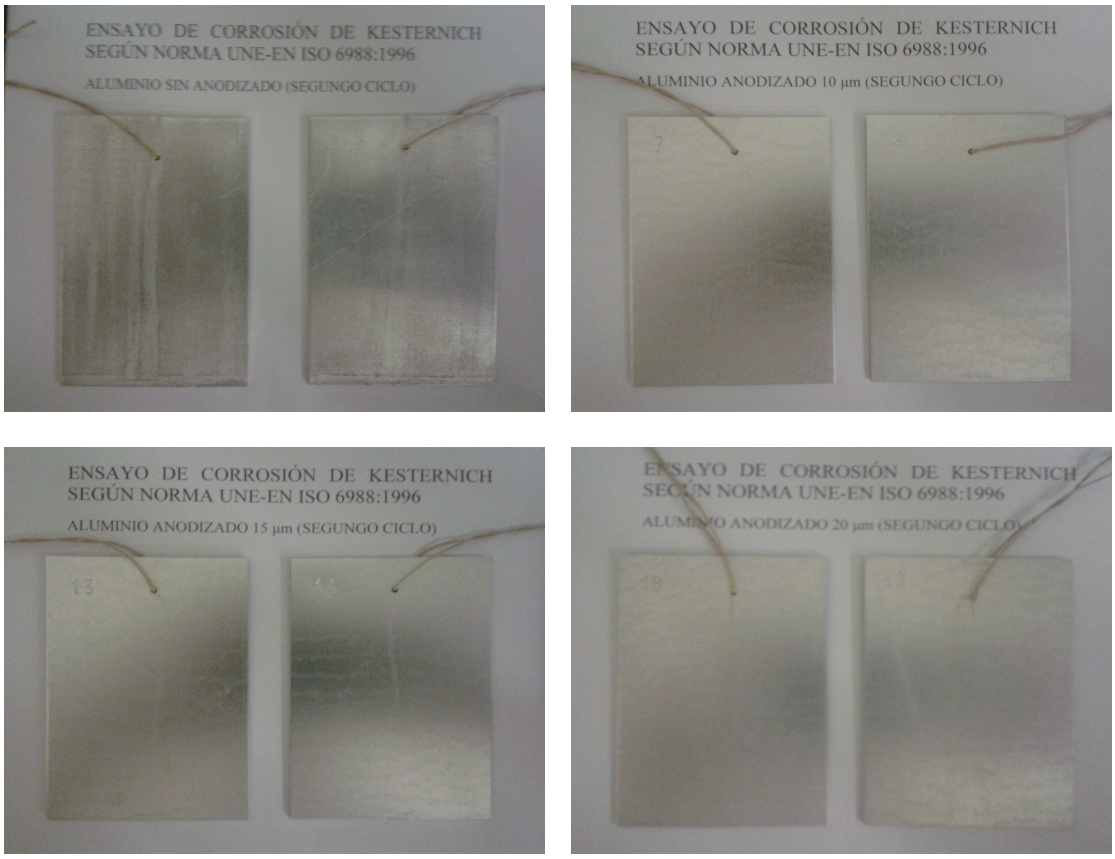


Figura 8.52: *Serie de imágenes de las piezas tras el segundo ciclo*

En las fotografías de la imagen 8.52 se observa que las piezas que no han sido anodizadas presentan algún inicio de corrosión en la superficie, pero en ningún caso de un nivel excesivo. Se trata de una ligera presencia de picaduras en partes de la superficie.
En el resto de piezas se aprecia claramente que la superficie posee alta resistencia a la corrosión y apenas ha sufrido daños respecto a su estado inicial.

Después del tercer ciclo el estado de las piezas es el que se muestra en las imágenes de la figura 8.53.

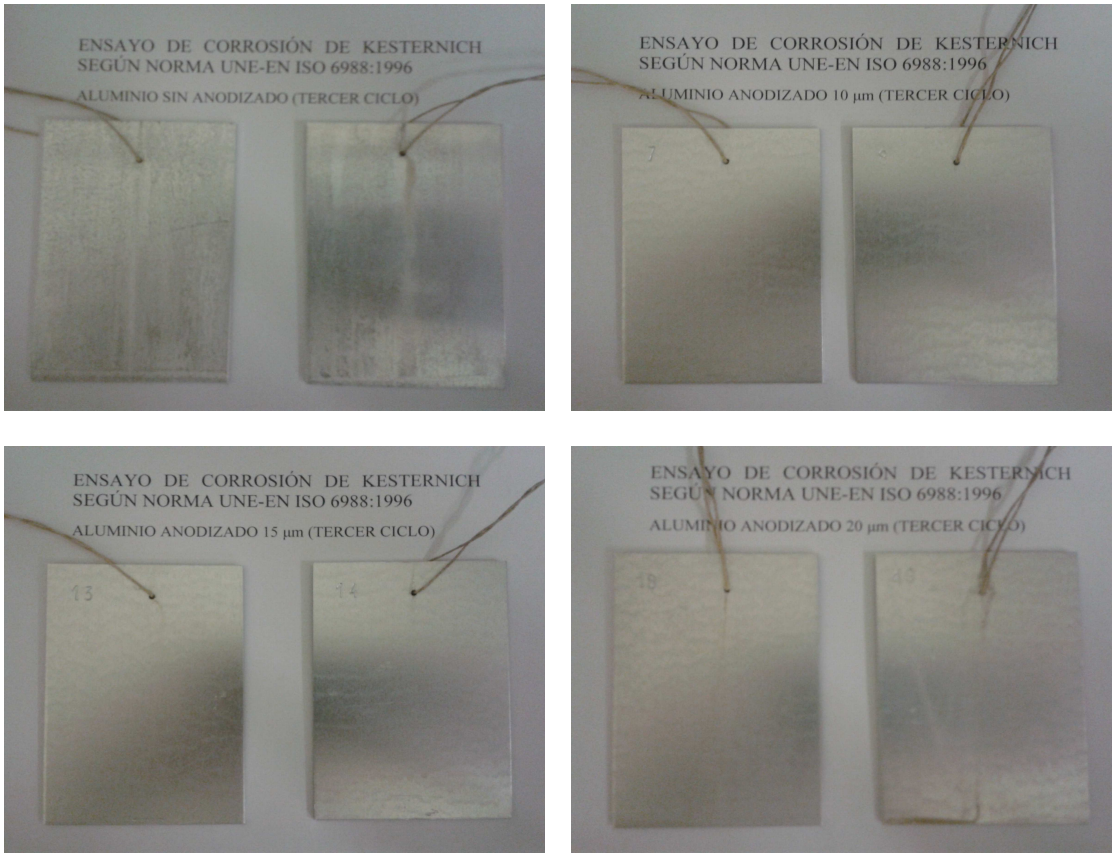


Figura 8.53: *Serie de imágenes de las piezas tras el tercer ciclo*

Se observa en la figura 8.53 que de nuevo las piezas que sufren un ligero nivel de corrosión son las de aluminio sin anodizado presentando un aumento en las picaduras existentes, lo que es lógico ya que no posee una capa protectora como en los otros casos. En el resto de las piezas, el estado de la superficie es correcto ya que no muestra esos signos de corrosión. Como se puede apreciar, la superficie en todos los casos es muy similar al estado inicial de las piezas a pesar de haber sufrido tres ciclos en condiciones agresivas.
En una de las piezas de la Clase AA 20 se aprecia una ligera marca vertical que surge a partir del agujero realizado para colocar la cuerda. Esta marca se origina precisamente a partir de la cuerda ya que posee un color similar y por lo tanto no tiene en absoluto nada que ver con algún tipo de corrosión.

Se han vuelto a tomar imágenes después del cuarto ciclo y se muestran en la figura 8.54.

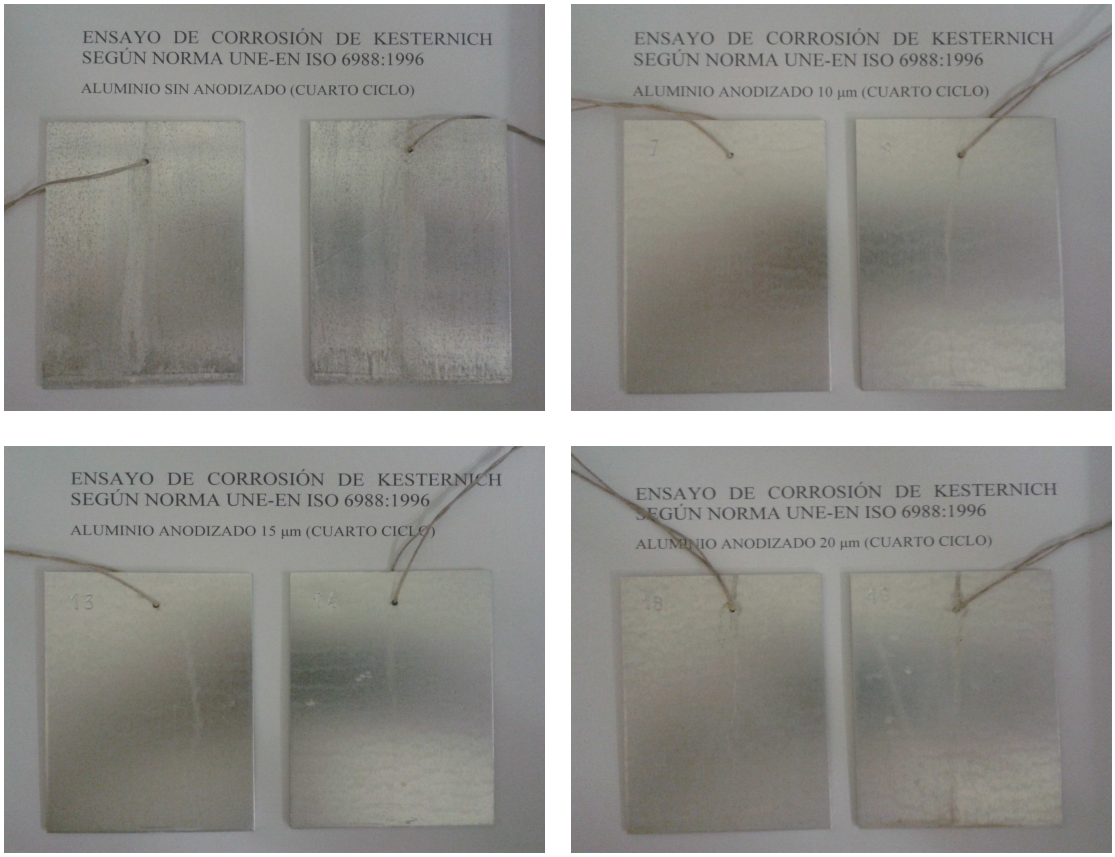


Figura 8.54: *Serie de imágenes de las piezas tras el cuarto ciclo*

Al igual que en los casos anteriormente mencionados, las piezas sin anodizado son las que más sufren los efectos de la corrosión y en estas imágenes mostradas se observa también de forma bastante clara la aparición de picaduras en la superficie de las piezas que no han sufrido el proceso de anodizado.
En el resto de piezas se puede apreciar que la superficie no varía apenas su estado con los continuos ciclos aplicados, por lo que queda claro que la resistencia a la corrosión tras el anodizado es mayor.
De nuevo se puede apreciar en una de las piezas de la Clase AA 20 la marca que se produce a partir de la cuerda pero ya se ha comentado que no es nada relacionado con corrosión.

A continuación se muestran en la figura 8.55 las imágenes de las piezas tomadas tras el quinto y último ciclo.

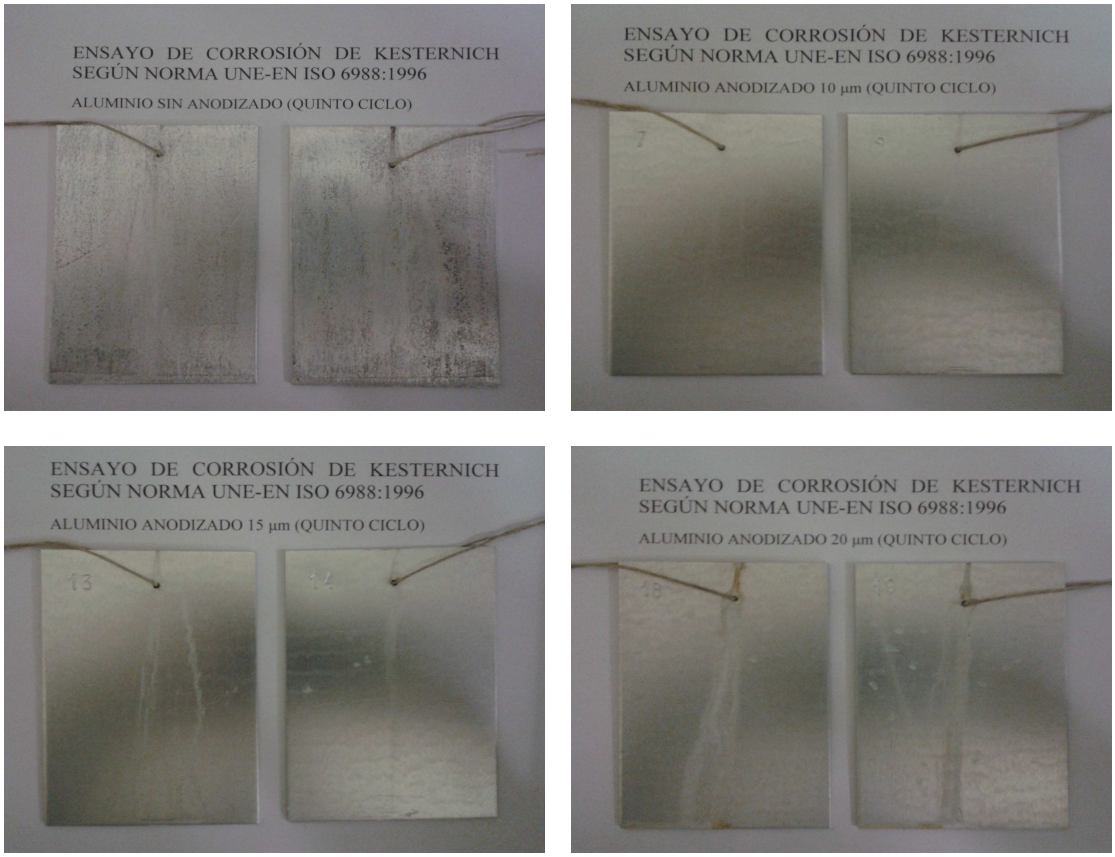


Figura 8.55: *Serie de imágenes de las piezas tras el quinto ciclo*

También en este último caso se aprecia que las piezas sin anodizado presentan una superficie más castigada por la corrosión cuyo comportamiento es lógico ya que no presenta una protección como en los otros tres casos. En las imágenes de estas piezas sin anodizado se observa la presencia de picaduras a lo largo de toda la superficie.
En el caso de las piezas de la Clase AA 20 se puede ver como comienzan a aparecer ciertos signos de corrosión pero de una manera muy ligera.
En las piezas de la Clase AA 10 y Clase AA 15 apenas se observan variaciones en el estado respecto al estado inicial de las mismas.
En este caso se observa en las piezas de Clase AA 15 y Clase AA 20 la marca que se ha comentado anteriormente que surge a partir del agujero donde se coloca la cuerda. Ahora las marcas son algo más claras que en ciclos anteriores dado que cada vez las condiciones que se aplican son más duras de soportar, pero cabe destacar de nuevo que no se debe a ningún tipo de corrosión sobre las piezas.

La manera más efectiva de analizar los resultados del ensayo de corrosión es realizar una comparación entre las piezas sin anodizar y piezas anodizadas. En esta comparación, que se muestra a través de las continuas fotografías, se aprecia claramente como tras el proceso llevado a cabo el comportamiento ante condiciones extremas es mejor soportado en las piezas anodizadas que en las mismas sin anodizar. Ya se ha ido comentando a lo largo de cada ciclo analizado que las piezas sin anodizado

han sufrido claros signos de corrosión mientras que las piezas con anodizado muestran prácticamente el mismo estado que al inicio del ensayo.
La gran resistencia de las piezas con capa anódica frente a condiciones extremas era el resultado que se esperaba obtener si el proceso de anodizado se había realizado de manera correcta y por lo tanto se ha comprobado que, en efecto, el proceso ha sido llevado a cabo correctamente.

9. Conclusiones.

El rectificador utilizado ha demostrado ser adecuado para realizar tratamientos de anodizado. La regulación de tensión tiene la suficiente velocidad de respuesta para mantenimiento de la intensidad de corriente que se desea.

La cuba y serpentín de refrigeración ha soportado sin ningún deterioro al contacto con la solución de ácido sulfúrico al 15 % en peso.

La preparación de la superficie de las muestras a anodizar ha sido la adecuada, como se demuestra por la regularidad de las capas obtenidas en todas las muestras.

Se ha comprobado que la superficie de intercambio térmico del serpentín de refrigeración permite mantener el baño a una temperatura de 20 ºC con el paso de poca cantidad de agua a una temperatura de 18 ºC.

El diseño y construcción de los embarrados, cátodos y ánodo han demostrado ser los adecuados para un trabajo cómodo y eficiente.

Las pinzas de sujeción y contacto diseñadas y construidas para llevar a cabo el proceso han sido adecuadas, como lo demuestra la regularidad de espesores obtenidos entre las diferentes muestras de la misma Clase.

La calidad de las capas anódicas obtenidas, comprobada con la realización de los ensayos exigidos por las Normas, ha sido totalmente satisfactoria.

10. Bibliografía, normas y referencias.

a) Aluminio.

[1] Varios autores, coordinado por Dr. Ing. C. Kammer: *Aluminium Handbook Band 2: Casting, Surface Treatment, Recycling and Ecology. Marketing & Kommunikation GMBH – Forming.* Ed. Aluminium-Verlag.

[2] C. Kammer: *Aluminium Handbook Vol 2: Forming, Casting, Surface treatment, Recycling and Ecology*. Ed. Aluminium-Verlag, Düsseldorf (1998).

[3] J.P. Sancho, J.J. del Campo, K.G. Grjotheim: *La metalurgia del aluminio.* Ed. Aluminium-Verlag (1994).

[4] Dietrich G. Altenpohl: *Aluminium: Technology, applications and environment – A Profile of a Modern Metal*. Ed. TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), Aluminum Association (1998).

b) Anodizado.

[5] A.W. Brace, P.G. Sheasby: *The technology of anodizing aluminium*. Ed. Technicopy Limited Stonehouse, England (1968).

[6] S. Wernick, R. Pinner: *Tratamientos superficiales y acabados del aluminio y sus aleaciones*. Ed. River, S.A.

[7] C.J. Amore, J.F. Murphy: *Sealing of anodized aluminium*. Ed. Metal Finishing (1965).

[8] Richard V. Paulson, Dr. G. H. Kissin: *Sealing Principles and Practices*. Ed. Aluminium Finishing Seminar (1973).

[9] Bernard R. Baker: *Sealing of anodic oxides*. Ed. Aluminium Finishing Seminar (1982).

[10] S. Wernick, R. Pinner, P.G. Sheasby: *The surface treatment and finishing of aluminium and its alloys*. Volum: 1 y 2 (1987).

[11] A. Brace, R. Draper: *Technology of anodizing aluminium*. Ltd. Tedington (1964).

[12] Ingenieros del grupo Pechine: *La enciclopedia del aluminio Tomos I, II y III*. Editorial Urmo, Bilbao (1968).

[13] S. Wernick, R. Pinner, Robert Draper: *The surface treatment of aluminium*. Ltd. Tedington (1964).

[14] *La práctica de la anodización*. Publicación CEDAL.

c) Congresos y Symposiums.

[15] Proceedings at the University of Nottinghan: *Conference on ANODISING ALUMINIUM*. September, 12 to 14 (1961).

[16] Proceedings at the University of Aston in Birminghan: *Symposium on anodizing aluminium*. The Aluminium Federation, April 12 and 13 (1967).

d) Normas.

[17] UNE 38019:1991. Anodización del aluminio y sus aleaciones. Vocabulario.

[18] UNE-EN ISO 7599. Anodización del aluminio y sus aleaciones. Especificaciones generales para recubrimientos de oxidación anódica sobre aluminio.

[19] UNE-EN ISO 2360:2004. Recubrimientos no conductores sobre materiales base conductores no magnéticos. Medición del espesor de recubrimiento. Método por corrientes inducidas sensibles a la variación de amplitud.

[20] UNE-EN ISO 1463:2005. Recubrimientos metálicos y capas de óxido. Medida del espesor. Método de corte micrográfico. (ISO 1463:2003).

[21] UNE-EN ISO 2143:2011. Anodización del aluminio y sus aleaciones. Estimación de la pérdida de poder absorbente de los recubrimientos anódicos de óxido después del sellado. Ensayo de la gota colorante con tratamiento ácido previo. (ISO 2143:2010).

[22] UNE-EN ISO 3210:2011. Anodización del aluminio y sus aleaciones. Evaluación de la calidad del sellado de los recubrimientos anódicos de óxido por medición de la pérdida de masa después de la inmersión en solución fosfocrómica. (ISO 3210:2010).

[23] UNE-EN ISO 2106:2011. Anodización del aluminio y sus aleaciones.
Determinación de la masa por unidad de superficie (densidad superficial) de los recubrimientos anódicos de óxido. Método gravimétrico. (ISO 2106:2011).

[24] UNE-EN ISO 6988:1996. Recubrimientos metálicos y otros recubrimientos no orgánicos. Ensayo al dióxido de azufre con condensación general de la humedad. (ISO 6988:1985).

11. Anexos.

Anexo 1: Norma UNE-EN ISO 7599. Anodización del aluminio y sus aleaciones. Especificaciones generales para recubrimientos de oxidación anódica sobre aluminio.

Anexo 2: Norma UNE 38-019-91. Anodización del aluminio y sus aleaciones. Vocabulario.

Anexo 3: Folletos técnicos de los productos de preparación de la superficie y sellado.

- DETAL
- ADIPRO S-32
- SELLAL F-40

Los anexos 2 y 3 de este documento se ha eliminado para cumplir con la Ley de Propiedad Intelectual de 1996 (Real Decreto Legislativo 1/1996, de 12 de abril).

Si desea obtener más información, puede ponerse en contacto con el autor o el tutor de este documento.

Este documento forma parte de la biblioteca de UNIVERSIDAD PUBLICA DE NAVARRA

ANEXO 3

Folletos técnicos de los productos

- DETAL
- ADIPRO S-32
- SELLAL F-40

PROQUIMIA
www.proquimia.com

DETAL

Ficha Técnica
11/2011

Desengrasante por inmersión y ultrasonidos especialmente indicado para piezas de aluminio pulido y aleaciones. Útil también para toda clase de metales.
Indicado para la limpieza de pastas de pulir, aceites, grasas, etc. sin matear ni manchar las superficies.

PRESENTACIÓN:

SACO 25 kg
Cód. 2001461

PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS:

> Polvo blanco.
> pH al 1% = 8,3 ± 0,3.

CARACTERÍSTICAS:

> Excelentes propiedades desengrasantes, emulgentes y dispersantes.
> Útil también como desengrasante por ultrasonidos y para el desengrase de piezas que tienen que sufrir posteriormente un tratamiento térmico.
> Indicado para la limpieza de pastas de pulir, aceites, grasas, etc. sin matear ni manchar las superficies.
> Inhibido contra el ataque al metal base, evitándose con ello la pérdida del brillo de las superficies pulidas.
> Gran capacidad secuestrante de la cal del agua, lo que evita la formación de velos sobre las piezas y la incrustación de las instalaciones.
> No deja residuos salinos ni restos de alcalinidad en las piezas, por lo que resulta muy adecuado para el desengrase de las piezas que tienen que sufrir un tratamiento térmico posterior. Evita también los problemas de roturas de cadenas que están en contacto con soluciones de DETAL y que se someten a tratamientos térmicos.
> No contiene silicatos.
> Fácilmente enjuagable.
> Fácil control del baño.

MODO DE EMPLEO:

Se emplea a la concentración del 1,5 al 3,5 % y a la temperatura de 45 a 70 °C. El tiempo de tratamiento oscilará entre 5 y 15 minutos, dependiendo del tipo y grado de suciedad. Los depósitos pueden ser de acero.

Valoración del baño:
Tomar una muestra de 5 cm^3 del baño y pasarla a un vaso de valoraciones. Añadir 10 cm3 de agua destilada y 4-5 gotas de naranja de metilo como indicador.
Valorar con ácido clorhídrico 0,1N hasta coloración roja de la solución.
Sean "a" los cm^3 de ácido clorhídrico 0,1N consumidos.
g/l DETAL = a x 2,6.

La información aquí contenida se ha preparado a nivel informativo.
Se basa en nuestros actuales conocimientos y puede ser modificada sin aviso previo.
PROQUIMIA, S.A. no se hace responsable de una incorrecta utilización del producto.

Ctra. de Prats, 6
08500 VIC (Barcelona)
T. (34) 93 883 23 53
F. (34) 93 883 20 50

ADIPRO S 32

Ficha Técnica
10/2011

Producto líquido utilizado en los procesos de satinado del aluminio de larga vida. Basado en Sorbitol. Producto fabricado bajo licencia ITALTECNO®.

PRESENTACIÓN:

GARRAFA 65 kg
Cód. 2024029

PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS:

> Líquido de incoloro.
> Densidad a 20 ºC = 1,14 ± 0,01 g/cm³.
> pH (1%) = 7,3 ± 0,5.

CARACTERÍSTICAS:

> Proporciona un satinado de aspecto regular.
> Simple y práctico de manejar.
> Las soluciones de sosa cáustica y ADIPRO S-32 permiten trabajar con elevados contenidos de aluminio en el baño, llegando a un estado de equilibrio en el cual el aluminio disuelto en el ataque alcalino y las pérdidas por arrastre estabilizan el contenido en aluminio alrededor de un valor que depende de las características de la instalación.
> Controla perfectamente la fluidez del baño (baja viscosidad), minimizando así los problemas de lavado después del satinado y eliminando las marcas generadas por la sosa cáustica en los perfiles acabados.
> Elimina la galvanización del aluminio causado por una alta concentración de metales (hierro, zinc, etc...).
> La adición de ADIPRO S-32 a los baños de satinado de sosa evita la formación de incrustaciones de aluminatos y reduce la cantidad de lodos en la cuba.
> Frente a los productos convencionales evita las limpiezas periódicas de las cubas con el consiguiente ahorro de mano de obra, tiempo y productos químicos.
> Su estado líquido permite la dosificación automática, en combinación con la sosa líquida, facilitando el mantenimiento de los baños de satinado y consiguiendo unas condiciones de trabajo constantes con el tiempo.
> ADIPRO S-32 no afecta a la depuración de los efluentes generados.
> No contiene cromatos, fluoruros, nitratos ni nitritos.

MODO DE EMPLEO:

Condiciones iniciales:
Concentración de sosa cáustica: 40 – 100 g/L
Concentración de ADIPRO S-32: mínimo 20g/L, óptimo 40 – 80g/L.

Condiciones en el punto de equilibrio:
Concentración de sosa libre: 80 – 115g/L.
Concentración de aluminio disuelto: 100 – 140g/L.
Relación (sosa libre/aluminio): aproximadamente entre 0,7 – 0,9g/L.
Concentración de ADIPRO S-32: 40 – 80g/L.

La información aquí contenida se ha preparado a nivel informativo.
Se basa en nuestros actuales conocimientos y puede ser modificada sin aviso previo.
PROQUIMIA, S.A. no se hace responsable de una incorrecta utilización del producto.

Ctra. de Prats, 6
08500 VIC (Barcelona)
T. (34) 93 883 23 53
F. (34) 93 883 20 50

Condiciones generales:
Temperatura del baño: óptima 55ºC
Tiempo de satinado: 2 a 30 minutos en función del grado de satinado deseado.

Es importante mantener el ratio entre el aluminio disuelto y la sosa cáustica dentro de unos límites. Si la concentración de sosa cáustica es inferior al ratio recomendado, puede ocurrir la precipitación de hidróxido de aluminio (ver gráfico adjunto).

Dadas las condiciones recomendadas y un teniendo en cuenta un arrastre promedio, el consumo de ADIPRO S-32 se sitúa alrededor de 7 g/m^2. Lógicamente, Éste valor puede variar dependiendo el grado de satinado deseado.

Montaje del baño:
1. Llenar la cuba con agua en un 60-70% de su capacidad.
2. Añadir lentamente la sosa cáustica, asegurando una correcta disolución.
3. Añadir el producto ADIPRO- S-32
4. Añadir agua hasta total capacidad de la cuba y calentar a temperatura de trabajo.

Es importante mantener el baño en las condiciones de trabajo recomendadas. Por este motivo interesa tener en cuenta los siguientes parámetros:

1. Alcalinidad libre: al aumentar el contenido de aluminio del baño, debe aumentarse la concentración de sosa, para así mantener la relación (sosa libre/aluminio).
2. ADIPRO S-32: Debe adicionarse aproximadamente un 20% de aditivo respecto a la sosa cáustica añadida. También puede controlarse la concentración de aditivo mediante técnica analítica.

Las adiciones de sosa cáustica, aditivo y agua deben ser en este orden y de la forma más fraccionada posible.

Valoración del baño:
Sosa cáustica libre y contenido de aluminio:

1. Tomar 2 cm^3 de baño homogeneizado y filtrado, pasarlo a un vaso de valoraciones, añadir 50 cm^3 de agua destilada y 2-3 gotas de fenolftaleina como indicador. Valorar con ácido clorhídrico 1N hasta decoloración del color rosado. Sean "a" los cm^3 consumidos.
2. Añadir 20 cm^3 de solución saturada de KF al 35%, el color rosado reaparecerá.
3. Valorar de nuevo con ácido clorhídrico 1N hasta desaparición del color rosado. Sean "b" los cm^3 consumidos:

- g/L sosa cáustica: (a x 20) - (b x 6,67)
- g/L Aluminio: b x 4,5

Contenido en ADIPRO S-32:

1. Tomar 5 cm^3 de baño homogeneizado y filtrado, pasarlo a un vaso de valoraciones, añadir 50 cm^3 de agua destilada y 20 mL exactos de $KMnO_4$ 1 N. Hervir durante 10 minutos exactos. La solución pasa a ser verde inicialmente (Mn^{6+}) y entonces puede observarse precipitado marrón-violáceo (MnO_2).
2. Añadir 20 mL exactos de ácido oxálico 1 N y 20 mL aproximadamente de ácido sulfúrico al 50 %. La solución debe ser completamente clara e incolora.

La información aquí contenida se ha preparado a nivel informativo.
Se basa en nuestros actuales conocimientos y puede ser modificada sin aviso previo.
PROQUIMIA, S.A. no se hace responsable de una incorrecta utilización del producto.

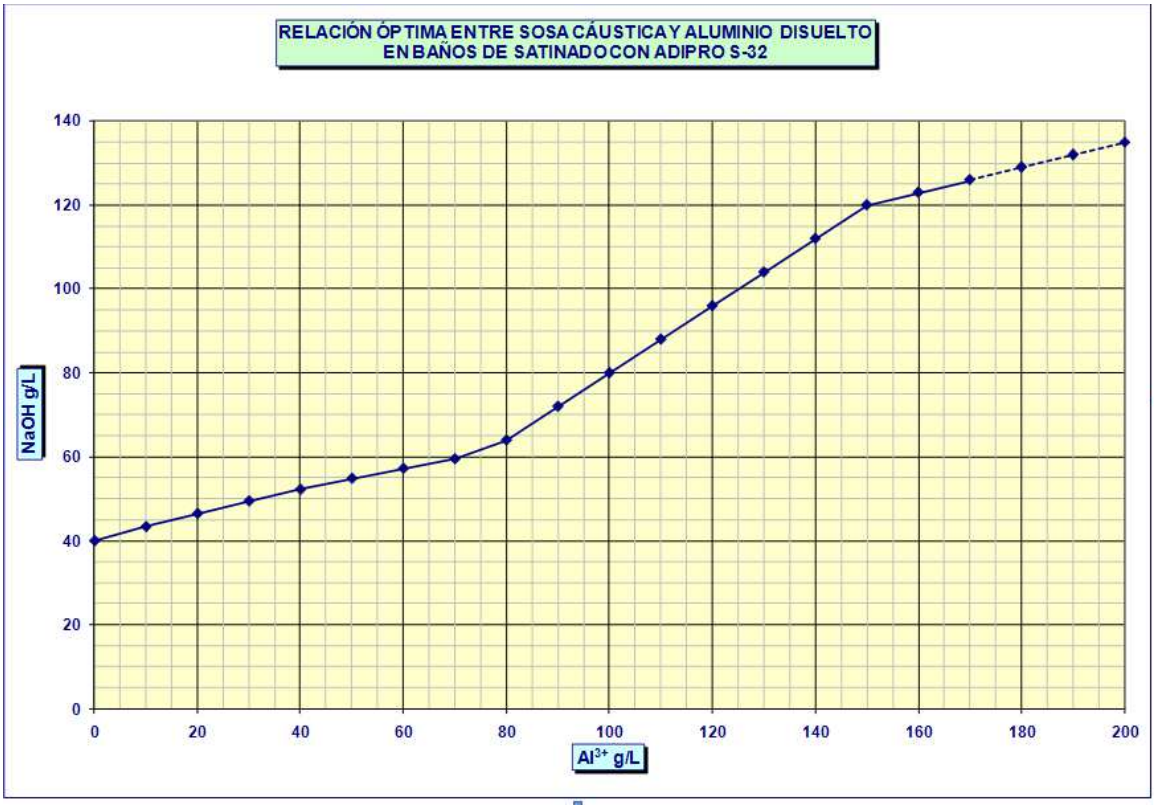
Ctra. de Prats, 6
08500 VIC (Barcelona)
T. (34) 93 883 23 53
F. (34) 93 883 20 50

3. Con la solución todavía caliente, valorar con $KMnO_4$ 1 N hasta aparición de un color rosa-violeta persistente. Los mL consumidos indican los puntos de ADIPRO S-32

- 1 punto: 5,6 g/L ADIPRO S-32

NORMAS DE MANIPULACIÓN:

Consultar ficha de seguridad.
No mezclar productos químicos puros.



Ctra. de Prats, 6
08500 VIC (Barcelona)
T. (34) 93 883 23 53
F. (34) 93 883 20 50

SELLAL F 40

Ficha Técnica
11/2011

Producto para el sellado en frío de capas anódicas sobre aluminio y aleaciones. Producto fabricado bajo licencia ITALTECNO®.

PRESENTACIÓN:

CAJA 20 kg
Cód. 2053005

PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS:

> Polvo verde rojizo con olor característica.
> pH (1%) = 5,5 ± 0,5

CARACTERÍSTICAS:

> Con SELLAL F-40 se obtiene una calidad perfecta de sellado, apta para la resistencia a la corrosión en exteriores, incluyendo ambientes industriales o marinos, según estándares Europeos (Aprobación EURAS-QUALANOD 1990) y mundiales.
> Reduce el problema de los tonos verdosos obtenidos con otros productos.
> Disminuye enormemente el consumo de energía comparado con los sistemas tradicionales de sellado.
> Los tiempos de inmersión se reducen en un 70-80%.
> No aparece residuo pulverulento sobre el material sellado.
> No aparecen problemas de calentamiento durante los periodos de cierre (vacaciones, mantenimiento, etc...)
> Calidad de sellado superior a los procesos tradicionales.
> Tests que ha superado SELLAL F-40.

- UNI3397 - 63 / ISO 2932 /ISO 2931/ ISO 3210 / ISO 2143 / DIN 54004 / DIN 50947 / DIN 50018.
- ASTM B117 MIL-STD-810C.
- ASTM B117-73; B-380-65, B-287, B-268-68, NX41-002.
- Todos los tests en cámara salina, niebla acética, cupro-acética, ISO 9770 y dióxido de azufre (Kesternich)
- Tests de exposición a la intemperie según QUALANOD.
- El sellado con SELLAL F-40 cumple las especificaciones miltares MIL-A-8625C según ASTM B117 MIL-STD - 810 C. Existen a su disposición documentos con la aprobación de autoridades militares.

MODO DE EMPLEO:

Concentración de SELLAL F-40:	4 - 8 g/L (óptimo 5 g/L)
Temperatura:	25 – 32ºC (óptimo 28 – 32ºC)
Tiempos de inmersión:	5µm = 4 minutos 10µm = 8 minutos 15µm = 12 minutos >20µm = 1 minuto/µm

Mayores temperaturas y mayores tiempos de inmersión pueden provocar la formación de polvo sobre el material sellado. Aunque su eliminación no implica daño al material, puede ensuciarse el material con aceite.

La información aquí contenida se ha preparado a nivel informativo.
Se basa en nuestros actuales conocimientos y puede ser modificada sin aviso previo.
PROQUIMIA, S.A. no se hace responsable de una incorrecta utilización del producto.

Ctra. de Prats, 6
08500 VIC (Barcelona)
T. (34) 93 883 23 53
F. (34) 93 883 20 50

Preparación de un baño nuevo de SELLAL F-40:

Llenar el tanque con agua desionizada a 30 – 35ºC
Premezclar SELLAL F-40 con agua, disolviendo pequeñas cantidades de producto en un contenedor aparte, adicionando a través de una bomba filtrante (5 – 10µm).
Agitar la solución en el baño con aire durante 15 – 20 horas, o hasta que SELLAL F-40 esté completamente disuelto.
Ajustar el pH hasta el rango de 5,5 – 6,5, usando ácido acético o ácido fórmico para disminuir el pH.

Nota: El uso de ácido sulfúrico diluido o sosa cáustica diluida para ajustar el pH, aunque no es perjudicial en pequeñas cantidades, no se recomienda para adiciones frecuente, ya que los sulfatos y las sales sódicas pueden causar problemas de polvo después de sellado, especialmente en la parte superior de los perfiles.

Consumo:
En las condiciones recomendadas y un arrastre promedio, el consumo se sitúa alrededor de 3 g SELLAL F-40/m^2.

Valoración del baño:
El análisis del baño se efectúa a través de la valoración del contenido en níquel.

1. Tomar 20 mL de baño homogeneizado y pasarlo a un vaso de valoraciones. Añadir 50 mL de agua destilada y 5 mL de solución buffer pH 10. Añadir unas gotas de solución de murexida como indicador.

2. Valorar con EDTA 0,1 N hasta que la solución vire a violeta. Sean "a" los cm^3 consumidos:

- g/l SELLAL F-40: (a x 1,285)

La concentración debe mantenerse alrededor de 5 g/L de SELLAL F-40. El pH debe mantenerse entre 5,5 y 6,5, usando ácido acético o ácido fórmico para disminuirlo, o bien amoniaco para aumentarlo.

Para aumentar el contenido en fluoruros (entre 300 y 800 mg/L), adicionar la cantidad necesaria de SELLAL FLUO, el cual evita la fluctuación de pH que ocurre con otras fuentes de fluoruros.

TRATAMIENTOS POST-SELLADO OPCIONALES:

Maduración
Para completar un proceso de impregnación en frío, se requiere un periodo de maduración. Esto puede realizarse por inmersión del material sellado en un baño con agua caliente a 60ºC. Este proceso facilita la manipulación y el control de las piezas, y debe ser considerado una parte esencial del proceso.

La información aquí contenida se ha preparado a nivel informativo.
Se basa en nuestros actuales conocimientos y puede ser modificada sin aviso previo.
PROQUIMIA, S.A. no se hace responsable de una incorrecta utilización del producto.

TÜVRheinland CERT ISO 9001 ISO 14001 BS OHSAS 18001

Ctra. de Prats, 6
08500 VIC (Barcelona)
T. (34) 93 883 23 53
F. (34) 93 883 20 50

Un buen lavado en agua fría antes y después del baño de SELLAL F-40 es esencial para conseguir minimizar las contaminaciones.

Una segunda etapa puede ser realizada en sulfato de níquel ($NiSO_4$ * 7 H_2O) , a 5 – 10 g/L y a una temperatura entre 60 y 65ºC durante 0,8 – 1 minuto por micra.

Una ventaja adicional de esta post-tratamiento es la reducción del "cracking" de la capa anódica.

CONTROL DE CALIDAD

Con este proceso de sellado (incluyendo la inmersión en agua caliente después de la impregnación en frío), el material sellado puede someterse a los mismos ensayos que el material sellado convencionalmente.

Los tests apropiados son:

- Test de la gota, según ISO 2143
- Test de inmersión, según ISO 3210

Los niveles de calidad aceptables están descritos en las especificaciones QUALANOD.

El material sellado según estas instrucciones, puede ser ensayado a las 2 o 3 horas después de la etapa de maduración.

Si las condiciones varían de las especificadas, se requerirá un mayor tiempo de maduración antes de efectuar los ensayos.

Como test de laboratorio, el material sellado puede madurarse rápidamente calentando a 50ºC durante 15 minutos.

SELLADO DESPUÉS DE LA COLORACIÓN CON COLORES ORGÁNICOS:

Después de la coloración con colores orgánicos es necesario presellar el material en una solución de acetato de níquel.

Acetato de níquel	10g/L
Temperatura	60°C
pH	5.5 – 6,5
Tiempo de inmersión	10 minutos

Un buen lavado es necesario antes del pre-sellado y después del sellado en frío.

De esta forma, el proceso recomendado sería el siguiente:

Coloreado orgánico
Lavado con agua fría
Pre-sellado (acetato de níquel a 10g/L)
Lavado con agua fría
Lavado con agua desmineralizada o agua de alta calidad.
Continuar con el proceso de sellado en frío con SELLAL F-40.

La información aquí contenida se ha preparado a nivel informativo.
Se basa en nuestros actuales conocimientos y puede ser modificada sin aviso previo.
PROQUIMIA, S.A. no se hace responsable de una incorrecta utilización del producto.

Ctra. de Prats, 6
08500 VIC (Barcelona)
T. (34) 93 883 23 53
F. (34) 93 883 20 50

COMENTARIOS ADICIONALES:

Las cubas deben ser de acero inoxidable AISI 316 o bien de acero recubierto de plástico resistente a los fluoruoros.
La vida del baño puede considerarse ilimitada si se utiliza agua desmineralizada.
Puede garantizarse un producto final sin polvo.
Se requiere un análisis semanal de la solución, según la técnica adjunta.
Se requiere filtración del baño si iones calcio o magnesio están presentes, u otros agentes contaminantes son introducidos al sistema.
Una pausa mínima se requiere entre el anodizado/coloreado y el sellado.
El lavado después de SELLAL F-40 es recomendable (puede usarse el mismo tanque de lavado antes del sellado).

NORMAS DE MANIPULACIÓN:

Consultar ficha de seguridad.
No mezclar productos químicos puros.

La información aquí contenida se ha preparado a nivel informativo.
Se basa en nuestros actuales conocimientos y puede ser modificada sin aviso previo.
PROQUIMIA, S.A. no se hace responsable de una incorrecta utilización del producto.

TÜVRheinland CERT ISO 9001 ISO 14001 BS OHSAS 18001
Ctra. de Prats, 6
08500 VIC (Barcelona)
T. (34) 93 883 23 53
F. (34) 93 883 20 50